



ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ/HIGH-MOLECULAR COMPOSITION

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1> EDN: HRVAKH

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХИТОЗАНА: СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Обзор

Николаев А.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-1941-7319;¹ Школа-лаборатория «Новый взгляд», Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (andreynikolaev2001[at]yandex.ru)

Предложена: 07.06.2026; Принята: 24.08.2026; Опубликовано: 27.08.2026

Аннотация

Статья посвящена обзору современных методов физико-химической характеристики хитозана — природного аминополисахарида, свойства которого существенно зависят от происхождения сырья и условий получения, рассмотрены основные структурные параметры хитозана.

Проведен сравнительный анализ основных физико-химических методов анализа. Особое внимание уделено влиянию степени деацетилирования и молекулярной массы на растворимость, биоактивность и коллоидные свойства хитозана, а также проблемам сопоставимости результатов.

Показано, что наиболее достоверная оценка физико-химических характеристик хитозана достигается при комплексном использовании взаимодополняющих методов анализа. Полученные данные могут быть использованы при стандартизации хитозана и разработке материалов для биомедицинских, фармацевтических и пищевых применений.

Ключевые слова: хитозан, степень деацетилирования, молекулярная масса, физико-химическая характеристика, ЯМР-спектроскопия, ИК-Фурье спектроскопия, динамическое светорассеяние, дзета-потенциал.

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CHITOSAN: STRUCTURAL PARAMETERS AND ANALYSIS METHODS

Review article

Nikolaev A.A.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-1941-7319;¹ School-laboratory "Novy Vzglyad", Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (andreynikolaev2001[at]yandex.ru)

Suggested: 07.06.2026; Accepted: 24.08.2026; Published: 27.08.2026

Abstract

The article reviews modern methods for the physicochemical characterisation of chitosan, a natural aminopolysaccharide whose properties depend significantly on the origin of the raw material and the conditions of production, and examines the main structural parameters of chitosan.

A comparative analysis of the main physicochemical analytical methods has been carried out. Particular attention is paid to the influence of the degree of deacetylation and molecular weight on the solubility, bioactivity and colloidal properties of chitosan, as well as to issues concerning the comparability of results.

It is shown that the most reliable assessment of the physicochemical characteristics of chitosan is achieved through the combined use of complementary analytical methods. The data obtained can be used in the standardisation of chitosan and the development of materials for biomedical, pharmaceutical and food applications.

Keywords: chitosan, degree of deacetylation, molecular weight, physicochemical properties, NMR spectroscopy, Fourier transform IR spectroscopy, dynamic light scattering, zeta potential.

Введение

Хитозан (Рис. 1) — линейный аминополисахарид, является биосовместимым и биоразлагаемым природным полимером, который состоит из N-ацетил-D-глюкозамина и D-глюкозаминовых звеньев [1], степень его полимеризации, соотношение ацетилированных и деацетилированных звеньев обуславливают большое разнообразие его химико-биологических свойств [2].

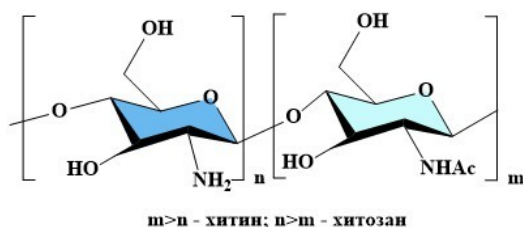


Рисунок 1 - Структурные звенья полимерных цепей хитина/хитозана
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.1>

В основе получения хитозана лежит реакция деацетилирования (Рис. 2) структурной единицы хитина (N-ацетил-D-глюкозамина).

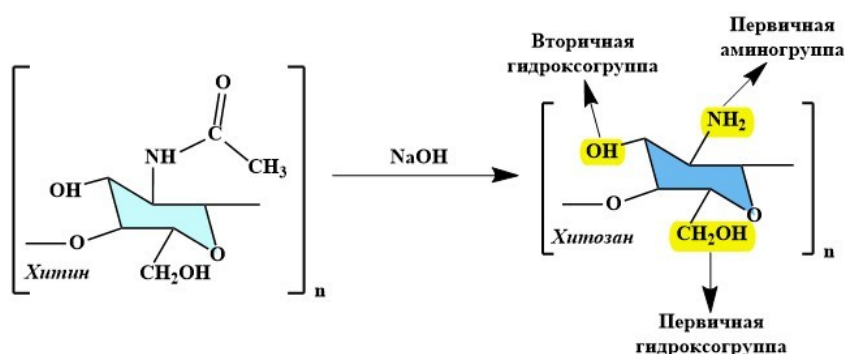


Рисунок 2 - Процесс получения хитозана из хитина реакцией деацетилирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.2>

При этом с помощью данной реакции можно получить хитозан с разной степенью деацетилирования (СД), в свою очередь, это сильно влияет на реакционную способность данного полимера [3], [4], [5]. Хитозан является нерастворимым в воде при нейтральных и щелочных значениях pH, в условиях же кислой среды аминогруппы хитозана протонируются (Рис. 3) и хитозан приобретает растворимость в воде [6], [7], классически в качестве растворителя используется 1% раствор уксусной кислоты.

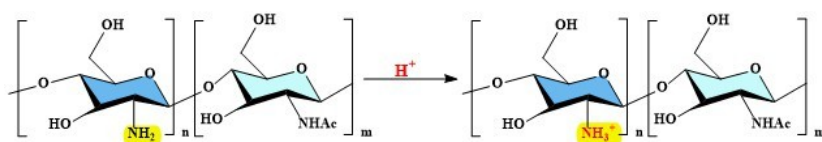


Рисунок 3 - Образование поликатиона
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.3>

Актуальным является обзор современных методов анализа хитозана, а также рассмотрение подходов к их валидации, обеспечивающих достоверность и воспроизводимость получаемых результатов.

Цель работы — систематизация современных методов физико-химической характеристики хитозана и анализ их возможностей, ограничений и областей применения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать структурные особенности хитозана, определяющие его физико-химические свойства.
2. Рассмотреть влияние степени деацетилирования (СД) и молекулярной массы (ММ) на свойства и поведение хитозана.
3. Систематизировать современные физико-химические методы анализа хитозана, используемые для определения его структурных характеристик.
4. Сравнить основные аналитические методы по информативности, ограничениям и областям применения.

Параметры, определяющие свойства хитозана

Свойства хитозана определяются совокупностью химических, молекулярных и надмолекулярных характеристик [8]. Уникальность этого полимера заключается в том, что небольшие изменения в его структуре приводят к радикальной смене физико-химического поведения и биологической активности [9], [10]. Далее представлен разбор основных ключевых параметров, определяющих свойства хитозана.

2.1. Степень деацетилирования и химическая природа

Хитозан является линейным аминополисахаридом, представляющим собой сополимер N-ацетил-D-глюкозамина и D-глюкозамина, соединенных β -(1 $\rightarrow$ 4) гликозидными связями [11], [12].

1. Степень деацетилирования являясь наиболее точным — это мольная доля деацетилированных звеньев [13], [14]. В научной литературе принято считать условной границей между хитином и хитозаном значение СД 50%: полимер с СД выше 50–60% классифицируется как хитозан и приобретает способность растворяться в разбавленных кислотах [12].

2. Первичные аминогруппы хитозана имеют константу ионной диссоциации рКа в интервале 6,3–6,5 [15]. При значении pH ниже этого порога аминогруппы протонируются ($-NH_3^+$), превращая макромолекулу в растворимый катионный полиэлектролит. Именно этот положительный заряд обуславливает большинство уникальных свойств хитозана: способность связываться с отрицательно заряженными компонентами клеточных мембран микроорганизмов, липидами и белками [10].

3. Наличие свободной аминогруппы делает хитозан гораздо более реакционноспособным по сравнению с хитином или целлюлозой, позволяя проводить селективную химическую модификацию [7].

2.2. Молекулярная масса (ММ) и полидисперсность

Молекулярная масса хитозана варьирует в чрезвычайно широком диапазоне — от олигомеров (<16 кДа) до высокомолекулярных образцов (до 2000 кДа) [9], [16].

1. ММ является определяющим фактором для вязкости растворов [7]. Например, повышение концентрации хитозана в уксусной кислоте с 2% до 4% может привести к увеличению вязкости в 30 раз.

2. В научной среде существует неопределенность границ категорий ММ — один производитель может называть образец «низкомолекулярным», а другой — «среднемолекулярным», что затрудняет сравнение результатов исследований [9]. Классификация молекулярной массы носит условный характер и может различаться в зависимости от источника.

2.3. Биологический источник и способ получения

Свойства конечного продукта предопределяются происхождением исходного хитина (панцири ракообразных, кутикула насекомых, клеточные стенки грибов или моллюски) [9].

1. Исходное сырье содержит хитин в различных формах: α -форма (антипараллельные цепи, наиболее стабильная, характерна для ракообразных), β -форма (параллельные цепи, выше реакционная способность, встречается у кальмаров) и γ -форма (смешанная, встречается в коконах насекомых) [9], [12]. Эти различия сохраняются и после деацетилирования, влияя на вязкость и кристалличность хитозана [17].

2. Традиционный щелочной гидролиз (NaOH 40–60%, температура 110–140°C) неизбежно ведет к частичной деполимеризации — разрыву гликозидных связей и падению ММ [9], [18]. Ферментативные методы позволяют получать более высокомолекулярные и однородные образцы [12], [19].

2.4. Надмолекулярная структура и кристалличность

Хитозан — это полукристаллический полимер, структура которого стабилизирована сложной системой водородных связей [7], [11].

1. Степень кристалличности достигает максимума у полностью ацетилированного хитина и полностью деацетилированного хитозана [9], [11]. Минимальная кристалличность наблюдается при промежуточных значениях СД (~50–60%).

2. Хитозан может существовать в гидратированной и безводной формах [11]. Переход в безводную форму является необратимым и происходит при нагревании выше 200°C или при длительном хранении, что сопровождается потерей растворимости и изменением биологической активности.

3. Равномерность распределения ацетильных групп вдоль цепи влияет на способность полимера к кристаллизации и его растворимость [9]. У нативного хитозана распределение обычно носит случайный характер.

Несмотря на детальное изучение влияния вышеуказанных параметров, в мировой практике сохраняется проблема отсутствия единых стандартов (ГОСТ) на методы анализа хитозана [16], [20]. Это приводит к низкой воспроизводимости результатов: образцы с одинаковой заявленной ММ, полученные разными методами, могут демонстрировать принципиально разную активность в биологических тестах [9]. Для корректной оценки параметров хитозана требуется использование взаимодополняющих аналитических методов.

Аналитические методы анализа характеристик хитозана и критерии их оценки

Для обеспечения воспроизводимости свойств изделий на основе хитозана необходим точный контроль его структурных параметров [9]. Однако характеристика данного биополимера представляет собой сложную методологическую задачу, обусловленную его природной композиционной неоднородностью, высокой полидисперсностью и выраженной склонностью макромолекул к самоассоциации в растворах [20], [21]. Одной из наиболее острых проблем в современной химии хитина и хитозана остается отсутствие единых общепринятых стандартов (ГОСТ) и валидированных методик, что нередко приводит к значительным расхождениям в результатах, полученных разными лабораториями или альтернативными методами на одних и тех же образцах [9].

Современный арсенал инструментальных подходов к анализу хитозана принято классифицировать на три основные группы: спектральные, хроматографические и химико-аналитические методы [13], [21], [22]. Выбор конкретной методики в исследовательской и заводской практике определяется соответствием ряду критериев оценки:

1. Точность и воспроизводимость: соответствие результатам референсных методов (в первую очередь ЯМР-спектроскопии) [14], [15], [23].

2. Чувствительность к примесям: способность метода давать достоверный результат в присутствии остаточных белков, минеральных веществ или гигроскопической влаги, которые часто встречаются в технических образцах и могут искажать спектральные или весовые показатели [13], [15].

3. Экспрессность и стоимость: возможность проведения серийных измерений в рутинной практике без использования дорогостоящих дейтерированных растворителей и сложной многоступенчатой пробоподготовки [24].

Ввиду того, что ни один из существующих методов не является абсолютно универсальным, для обеспечения максимальной достоверности в современной аналитической химии рекомендуется использовать комплексный подход, подразумевающий верификацию параметров как минимум двумя независимыми методами [13], [21]. В следующих разделах рассмотрены основные методы анализа хитозана, включая определение степени деацетилирования, молекулярной массы, термических и элементных характеристик.

3.1. Определение степени деацетилирования хитозана

Степень деацетилирования является наиболее важной химической характеристикой хитозана, так как именно она определяет содержание реакционноспособных аминогрупп, обуславливающих растворимость полимера в кислых средах, его физико-химическое поведение и биологическую активность [25], [26], [27]. СД представляет собой мольную долю звеньев D-глюкозамина в полимерной цепи [21]. Традиционно граница между хитином и хитозаном проводится по значению СД 50%: полимер с содержанием деацетилированных звеньев выше 50–60% классифицируется как хитозан и приобретает способность растворяться в разбавленных органических и неорганических кислотах [12], [13]. Для точного определения этого показателя в современной практике используется комплекс инструментальных методов, каждый из которых обладает специфическими преимуществами и ограничениями.

3.1.1. ИК-спектроскопия

ИК-спектроскопия является наиболее распространенным методом экспресс-анализа хитозана, позволяющим проводить как качественную идентификацию полимера, так и количественную оценку его степени деацетилирования [13], [14], [28]. Популярность метода обусловлена простотой пробоподготовки, возможностью анализа нерастворимых образцов и чувствительностью к структурным изменениям [29], [30]. Благодаря наличию различных функциональных групп хитозана СД может определяться по нескольким характерным полосам ИК-спектра (Рис. 4, Рис. 5).

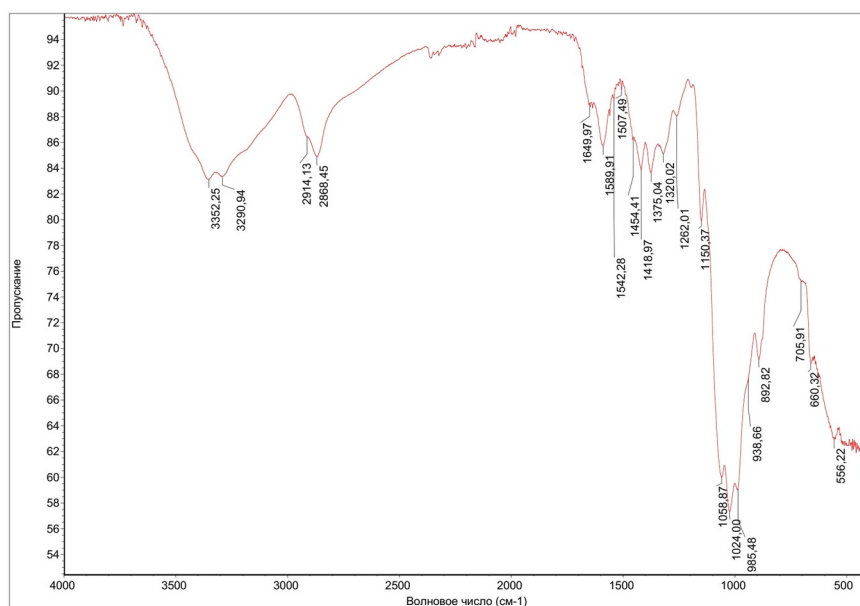


Рисунок 4 - ИК-спектр пропускания образца хитозана
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.4>

Примечание: по ист. [29]

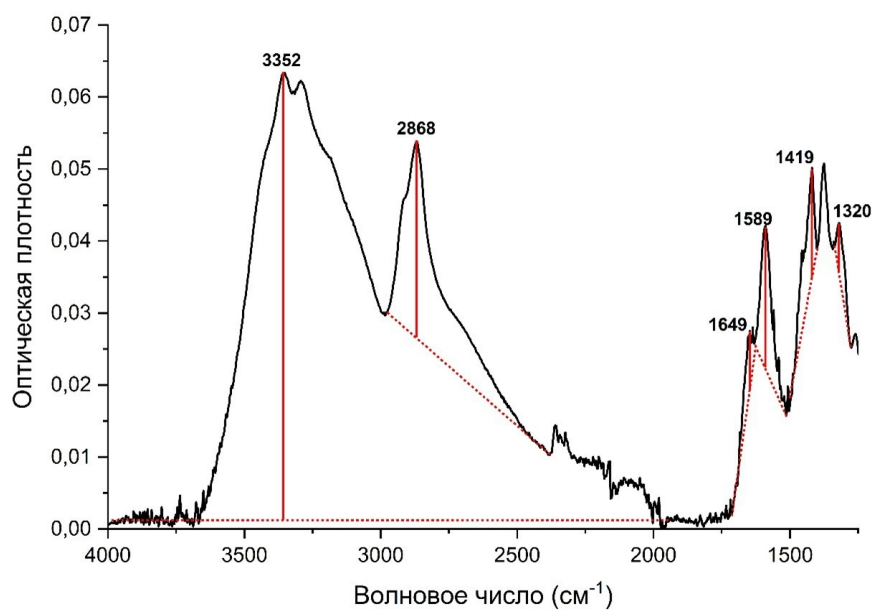


Рисунок 5 - ИК-спектр поглощения образца хитозана

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.5>*Примечание: по ист. [29]*

Оценка СД основана на соотношении интенсивностей полос, связанных с ацетильными и деацетильными группам [28], [31].

1. Амид I ($1650\text{--}1663\text{ см}^{-1}$) является первичным индикатором ацетилирования, соответствуя валентным колебаниям связи C=O [32], [33]. Интенсивность этой полосы падает по мере удаления ацетильных групп и практически исчезает при полной деацетилировании [14].

2. Амид II ($1550\text{--}1561\text{ см}^{-1}$) и Амид III (около 1320 см^{-1}): полоса Амид II часто перекрывается сигналами аминогрупп (1590 см^{-1}), поэтому исследователи всё чаще отдают предпочтение полосе Амид III [28], [33], [34].

Точность метода критически зависит от выбора полосы сравнения:

1. Валентные колебания C-H ($2870\text{--}2880\text{ см}^{-1}$) соответствуют скелету макромолекулы и практически не зависят от влажности образца [18].

2. Деформационные колебания CH_2 (1420 см^{-1}): их использование в паре с Амидом III (соотношение A_{1320}/A_{1420}) обеспечивает наиболее стабильные результаты, сопоставимые с данными ЯМР [14], [28].

Спектр ИК-Фурье чувствителен к надмолекулярной организации полимера. Так, в высококристаллическом α -хитине полоса Амид I расщепляется на два четких пика (1662 и 1630 см^{-1}), что обусловлено наличием двух типов межмолекулярных водородных связей [31]. В β -форме (например, из кальмаров) или в аморфном хитозане наблюдается только один пик [28]. Эти различия могут приводить к систематическим ошибкам, если калибровочная модель не учитывает источник сырья [31].

Главным препятствием для достижения высокой точности является экстремальная гигроскопичность хитозана [23], [33]. Сорбированная вода дает широкое поглощение при 3450 см^{-1} и деформационный пик при 1640 см^{-1} , который напрямую маскирует амидные полосы [24].

1. Рекомендуется глубокое обезвоживание образцов (в вакууме над P_2O_5 , лиофилизацию или сушку при $80\text{--}105^\circ\text{C}$ в течение $10\text{--}16$ часов) перед анализом [35].

2. На воспроизводимость данных влияет выбор точек для проведения базовой линии [18]. Ошибки в определении нулевого уровня для высоты или площади пиков могут вызвать расхождения в значениях СД до $10\text{--}15\%$ [14].

Несмотря на статус «рутинного» метода, ИК-спектроскопия требует строгого контроля влажности и верификации используемых уравнений с помощью абсолютных методов (ЯМР или потенциометрия). Наиболее достоверным считается комплексный подход с использованием нескольких спектральных соотношений одновременно, основные расчётные уравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Примеры расчётных уравнений с использованием ИК-спектроскопии
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.6>

Уравнение	Источник
$\text{СД}(\%) = 100\% - \left(31,92 \cdot \frac{A(\nu_{C=O})}{A(\delta_{N-H})} - 12,20 \right)$	[28], [36], [37]
$\text{СД}(\%) = 100\% - \frac{\frac{A(\omega_{CH_2})}{A(\delta_{C-H})} - 0,3822}{0,03133}$	[28]
$\text{СД}(\%) = 100\% - \frac{A(\nu_{C=O})}{A(\nu_{OH})} \cdot \frac{100}{1,33}$	[14], [18], [33]
$\text{СД}(\%) = 100\% - \frac{A(\nu_{C=O})}{A(\nu_{CH})} \cdot \frac{100}{1,33}$	[14, 18, 35]
$\text{СД}(\%) = 100\% - 115 \cdot \frac{A(\nu_{C=O})}{A(\nu_{OH})}$	[14], [33]
$\text{СД}(\%) = 100\% - 115 \cdot (A(\omega_{CH_2}) - A(\delta_{C-H}))$	[24]
$\text{СД}(\%) = 100\% - (31,918 \cdot (A(\omega_{CH_2}) - A(\delta_{C-H})) - 12,2)$	[17]
$\text{СД}(\%) = 100\% - 35,461 \cdot \frac{A(\delta_{N-H})}{A(\nu_{CH})}$	[17], [34]
$\text{СД}(\%) = 100\% - \left(442,48 \cdot \frac{A(\omega_{CH_2})}{A(\nu_{OH})} - 13,92 \right)$	[17], [28]
$\text{СД}(\%) = 100\% - 85,5 \cdot \left(\frac{A(\nu_{C=O})}{A(\nu_{OH})} + \frac{A(\nu_{C=O,1630})}{A(\nu_{OH})} - 0,13 \right)$	[17], [38]

В целом, ИК-спектроскопический метод вычисления СД(%) обеспечивает сравнительно быстрые измерения, но количественная воспроизводимость спектров и в некоторой степени зависящие от оператора процедуры настройки исходных значений для считывания оптических коэффициентов являются слабыми сторонами этого метода [14].

3.1.2. ЯМР-спектроскопия

Спектроскопия ядерного магнитного резонанса широко рассматривается как референсный метод и часто используется как «золотой стандарт», являясь наиболее точным методом определения степени деацетилирования (СД), обеспечивающим погрешность в пределах $\pm 1\%$ [24], [29]. Благодаря своей прецизионности этот метод был официально утвержден Американским обществом по испытанию материалов в качестве стандартного для характеристики хитозана [14], [21]. Примеры ЯМР-спектров и их обработки представлены на рисунках 6–8.

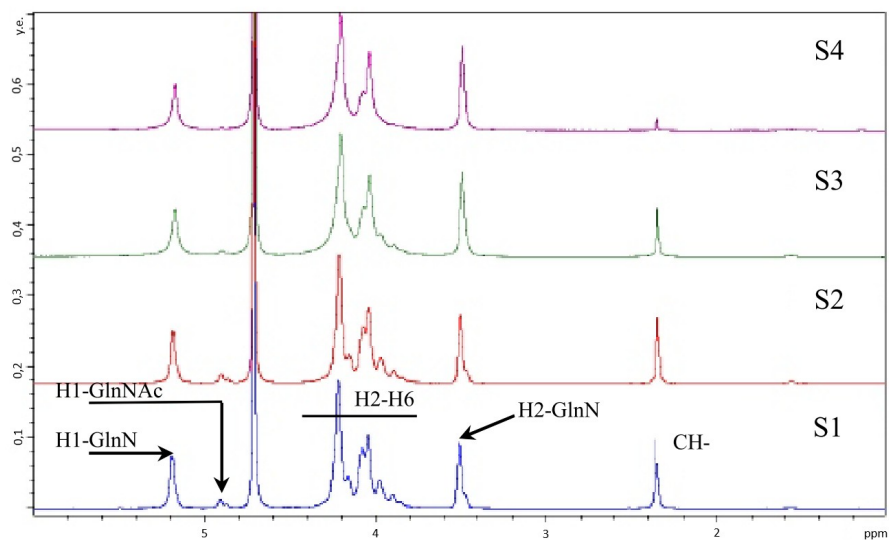


Рисунок 6 - Пример обработки ЯМР-спектра
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.7>

Примечание: по ист. [14]

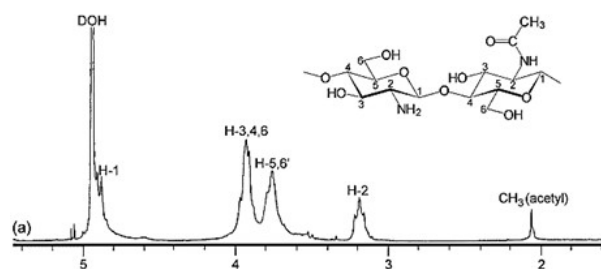


Рисунок 7 - Пример ЯМР-спектра хитозана, 300 МГц
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.8>

Примечание: по ист. [39]

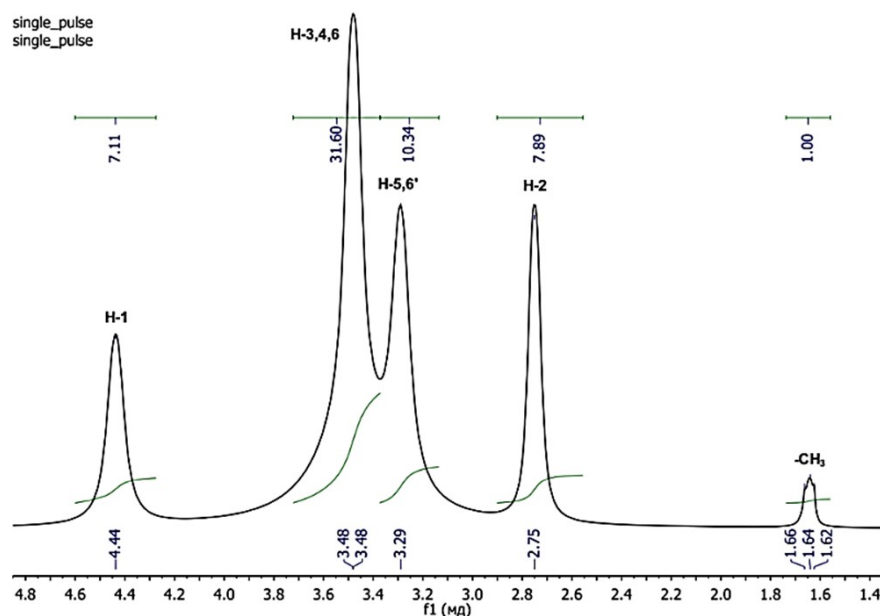


Рисунок 8 - ЯМР образца хитозана, 600 МГц
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.9>

Примечание: по ист. [29]

В отличие от относительных физико-химических подходов (таких как ИК-спектроскопия), ЯМР является абсолютным методом количественного анализа: интенсивность резонансных сигналов напрямую пропорциональна количеству ядер резонирующих атомов в образце [21]. Это исключает необходимость построения калибровочных кривых по внешним эталонам, что критически важно для полимера с высокой природной композиционной неоднородностью [9], [23]. Метод позволяет работать с минимальными навесками вещества (около 5 мг), что делает его незаменимым при дефиците исследуемого материала.

Анализ чаще всего проводят в растворах (жидкостный ЯМР), что требует обеспечения полной растворимости полимера.

1. Обычно используют дейтерированную соляную (DCl) или уксусную (CD_3COOD) кислоту для улучшения растворимости и подавления межцепных взаимодействий [13], [14], [23].

2. Для улучшения разрешения спектров, снижения вязкости растворов и разрушения макромолекулярных агрегатов съемку проводят при повышенных температурах — от 60 до 90°C [23].

3. Одной из проблем является перекрывание сигналов аномерного протона H^1 (около 4,5–4,8 м.д.) интенсивным пиком остаточной воды (HDO при 4,7–4,8 м.д.) [24]. Для минимизации этой ошибки образцы подвергают многократной лиофилизации из D_2O для обмена лабильных протонов на дейтерий [14]. Также применяется подавление сигнала растворителя с помощью селективных импульсов, хотя это может искажать близлежащие сигналы анализируемого полимера [21].

Количественная интерпретация спектров ^1H ЯМР базируется на интеграции нескольких групп сигналов [21], [31]:

1. Ацетильные группы: синглет протонов метильной группы ($-\text{CH}_3$) проявляется в сильном поле при 2,0–2,1 м.д.
2. Протоны глюкопиранозного кольца: группа сигналов H_2-H_6 фиксируется в интервале 3,1–4,0 м.д.
3. Протон H_2 : сигнал при 3,1–3,2 м.д. часто используется как индивидуальный референс, так как он наиболее четко отделен от других пиков кольца.

Существует несколько математических подходов к расчету СД. Наиболее распространенные формулы сравнивают интенсивность метильных протонов (ICH_3) либо с суммарной интенсивностью всех протонов кольца (IH_1-H_6), либо с сигналом протона H_2 деацетилированного звена [21]. Выбор конкретной формулы часто зависит от СД образца и качества разрешения спектра [14], основные расчётные уравнения представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Примеры расчётных уравнений с использованием ЯМР

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.10>

Уравнение	Источник
$\text{СД}(\%) = \left(1 - \frac{\frac{1}{3} I_{\text{CH}_3}}{\frac{1}{6} I_{\text{H}_2-\text{H}_6}}\right) \cdot 100\%$	[14], [23], [27]
$\text{СД}(\%) = \left(1 - \frac{I_{\text{CH}_3}}{3 I_{\text{H}_1-\text{GlnNAc}}}\right) \cdot 100\%$	[14], [40]
$\text{СД}(\%) = \left(1 - \frac{\frac{1}{3} I_{\text{CH}_3}}{I_{\text{H}_2-\text{GlnN}}}\right) \cdot 100\%$	[14], [41]
$\text{СД}(\%) = \frac{I_{\text{H}_1-\text{GlnN}}}{I_{\text{H}_1-\text{GlnN}} + I_{\text{H}_1-\text{GlnNAc}}} \cdot 100\%$	[14], [42]
$\text{СД}(\%) = \frac{I_{\text{H}_1-\text{GlnN}}}{I_{\text{H}_1-\text{GlnN}} + \frac{1}{3} I_{\text{CH}_3}} \cdot 100\%$	[14], [42]

- $I_{\text{H}_1-\text{GlnN}}$ является интегральной интенсивностью для H_1 (GlnN);
- $I_{\text{H}_1-\text{GlnNAc}}$ является интегральной интенсивностью для H_1 (GlnNAc);
- I_{CH_3} является интегральной интенсивностью для $-\text{CH}_3$;
- $I_{\text{H}_2-\text{H}_6}$ — сумма интегральных интенсивностей для H_2 , H_3 , H_4 , H_5 , и H_6 .

Расчёт по уравнениям не всегда возможен по причине отсутствия детектируемого пика водорода $\text{H}-1_{\text{GlnNAc}}$, этот пик был перекрыт пиком сигнала дейтерированной воды или его интенсивность крайне мала (она уменьшается из-за снижения молярного содержания N-ацетилглюкозамина в молекуле хитозана и повышения СД(%), соответственно) [43].

Несмотря на статус эталона, широкое применение ЯМР в рутинной практике ограничено высокой стоимостью оборудования и дейтерированных реактивов, необходимостью участия высококвалифицированного персонала и длительностью подготовки проб [14]. Метод крайне чувствителен к химической чистоте образцов: примеси остаточных белков или растворителей создают «паразитные» сигналы, которые могут сделать количественную интеграцию невозможной.

3.1.3. УФ-спектрофотометрия

Метод ультрафиолетовой спектрофотометрии рассматривается как чувствительный и экономически доступный метод для количественного определения СД хитозана, особенно в тех случаях, когда количество доступного образца ограничено [9]. В основе метода лежит явление избирательного поглощения в УФ-области (190–215 нм), связанного с электронными переходами в карбонильных группах ($\text{C}=\text{O}$) остаточных N-ацетильных звеньев [30], [44].

Прямое измерение поглощения в области 200–210 нм часто осложняется наложением сигналов растворителя (например, уксусной кислоты) и мешающим влиянием фонового поглощения макромолекул [9], [30]. Для решения этой проблемы в современной аналитической практике в ряде работ используется дифференциальная (производная) УФ-спектрофотометрия (FDUV) [9]. Сущность данного подхода заключается в математическом преобразовании спектра поглощения, что позволяет достичь более высокого разрешения и селективности.

Метод характеризуется исключительной чувствительностью: порог обнаружения N-ацетил-D-глюкозамина составляет всего 0,0005 мг/мл в 0,01 М уксусной кислоте [9]. Это позволяет проводить полноценную характеристику при использовании минимальных навесок вещества (около 2 мг), что является неоспоримым преимуществом при работе с дорогостоящими или синтезированными в малых объемах образцами хитозана [30], [44]. В отличие от ЯМР-спектроскопии, метод не требует использования дорогостоящих дейтерированных растворителей и сложной пробоподготовки, что делает его предпочтительным для рутинных лабораторных анализов и заводского контроля качества [9].

Несмотря на высокую точность, на результаты УФ-анализа могут влиять сопутствующие компоненты. Основной проблемой является присутствие белковых примесей, которые также обладают поглощением в УФ-области [9]. Однако максимум поглощения белков обычно находится в районе 280 нм, что достаточно удалено от аналитической зоны 203 нм, благодаря чему их влияние на результат измерения СД ограничено [9].

Спектральные характеристики хитозана в УФ-области зависят не только от его состава, но и от молекулярной массы [30]. Было обнаружено, что по мере снижения ММ (от 55 кДа до 11 кДа) оптическая плотность растворов хитозана в интервале 250–300 нм закономерно увеличивается. Таким образом, УФ-спектрофотометрия является быстрым и чувствительным методом, демонстрирующим высокую корреляцию с референсными методами [9]. Однако точность результатов в значительной степени может зависеть от способа обработки спектров и выбора аналитических параметров [30].

3.1.4. Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ является фундаментальным неразрушающим методом исследования надмолекулярной организации и фазового состава хитозана, позволяющим проводить анализ его структуры на уровне надмолекулярной и кристаллической организации [31], [45]. РФА выступает важным инструментом для косвенной оценки СД через мониторинг изменений в кристаллической решетке полимера [46].

На дифрактограммах хитозана обычно фиксируются два основных кристаллических рефлекса [47], [48]:

1. Рефлекс 020 (10°): напрямую связан с наличием ацетилированных аминогрупп. Установлено, что по мере увеличения СД интенсивность этого пика закономерно снижается, а сам он смещается в сторону больших углов.
2. Рефлекс 110 (20°): связан с упорядоченной упаковкой цепей в кристаллической решётке. При деацетилировании этот пик может смещаться в область меньших углов.

Хитозан — это полукристаллический полимер, степень упорядоченности которого критически зависит от его химической чистоты [9], [47]. Метод РФА незаменим для различения полиморфов хитозана, которые образуются в зависимости от условий обработки и формы [11]:

1. Гидратированная форма: хитозан, стабилизированный молекулами воды, которые формируют колонновидные структуры между слоями.
2. Безводная форма: хитозан, получаемый при гидротермальной обработке (выше 200°C) или длительном хранении. Переход в эту форму необратим и сопровождается потерей растворимости полимера. Также метод позволяет выявлять структурные различия, обусловленные источником сырья.

Для оценки упорядоченности часто применяют индекс кристалличности (CrI), рассчитываемый по отношению интенсивности кристаллического пика к аморфному гало [47], [48]. Однако исследователи указывают на недостатки этого подхода: использование высоты пиков может давать погрешность до 0.4–0.8 для одного образца [47]. Более достоверным признан расчет истинной степени кристалличности через интегральные площади дифрактограммы. Главным ограничением метода является его чувствительность к термической предыстории образца и способу его экстракции, что требует осторожности при сравнении данных разных лабораторий [43].

Индекс кристалличности (CrI %) для рентгеновского пика хитозана 020 можно определить по уравнению [47], [48]:
$$\text{CrI}_{020} = 100\% \cdot \frac{I_{020} - I_{am}}{I_{020}}$$
, основное уравнение расчёта [48] СД(%) через CrI_{020} :
$$\text{CrI}_{020} = -0,7529 \cdot \text{СД}(\%) + 103,97$$
;

· I_{020} – максимальная интенсивность ниже 13°2θ;

· I_{am} интенсивность аморфной дифракции.

Пример дифракционного спектра приведён на рисунке 9.

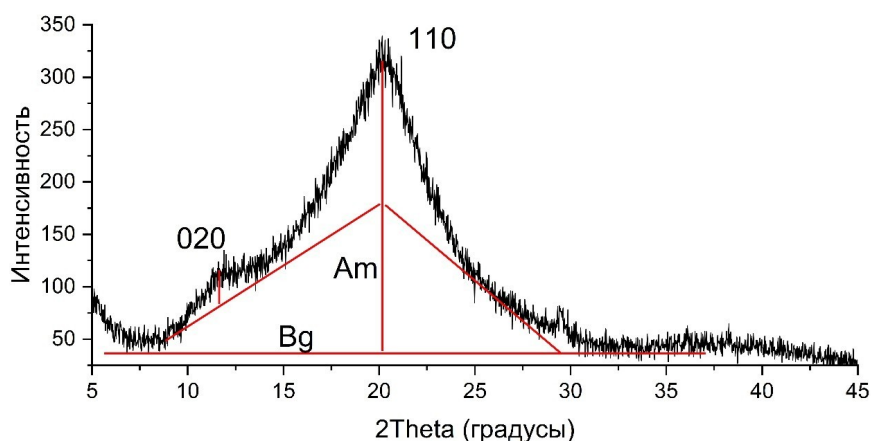


Рисунок 9 - Рентгенодифракционный профиль хитозана

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.11>

С учётом бэкграунда (Bg) уравнение расчёта примет вид:
$$\text{CrI}_{020} = 100\% \cdot \frac{(I_{020} - I_{Bg}) - (I_{am} - I_{Bg})}{I_{020} - I_{Bg}}$$

Таким образом, рентгенофазовый анализ предоставляет уникальные данные о надмолекулярной перестройке хитозана в процессе деацетилирования. Несмотря на то, что он является косвенным методом определения СД, его способность фиксировать изменения фазового состояния и полиморфизма делает его обязательным компонентом комплексного анализа хитозана. Обобщение всех методов определения СД представлено в таблице 3.

Таблица 3 - Методы определения степени деацетилирования хитина и хитозана

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.12>

Метод анализа	Принцип измерения	Диапазон СД, %	Преимущества	Ограничения и недостатки	Тип оборудования	Сложность выполнения	Источник
ЯМР-спектроскопия (^1H , ^{13}C ЯМР в растворе, ^{13}C / ^{15}N в твёрдом теле)	Сравнение интегральных интенсивностей сигналов протонов или углеродов метильной группы N-ацетильных звеньев (~2.0 – 2.1 ppm) и протонов/углеродов глюкозаминного кольца ($\text{H}_1\text{--H}_6$).	0 – 100	Высокая точность и прецизионность; абсолютный метод (не требует калибровки); возможность изучения распределения ацетильных групп и подтверждения строения биополимера.	Высокая стоимость оборудования и анализа; необходимость полной растворимости образца в дейтерированных растворителях (D_2O , CD_3COOD , DCI); чувствительность к чистоте реагентов.	ЯМР-спектрометр (от 300 до 750 МГц), например, Bruker Avance, Varian Inova.	Высокая: сложная пробоподготовка, длительное приготовление растворов, требуется квалифицированная интерпретация спектров.	[14], [21], [23], [24]
ИК-спектроскопия	Определение отношения интенсивностей специфических полос поглощения амида I (~1655 cm^{-1}) к эталонным полосам (3450 cm^{-1} , 2870 cm^{-1} , 1420 cm^{-1} и др.) на основе базовых линий.	0 – 100 (при адекватной калибровке)	Экспрессность, информативность, низкая стоимость; возможность анализа твердых образцов (порошки, пленки); идентификация кристаллических форм (α , β).	Сильная зависимость от влажности (-ОН - группы воды); субъективность выбора базовой линии; обязательная калибровка по стандартам (ЯМР); точность зависит от качества подготовки таблеток КВг.	ИК-фурье-спектрометр (например, Vertex 70, Perkin-Elmer 1725X, Mattson Genesis II).	Средняя: требует тщательной сушки образцов, прессования таблеток КВг и математической обработки спектров.	[24], [28], [33], [34]
Потенциометрическое титрование	Кислотно-основное титрование протонированных аминок групп	Преимущественно >50 – 60 (ограничено растворимостью)	Доступность реагентов, простота оборудования, прямое	Чувствительность к ионной силе, примесям (белки, зольность) и	Иономер/pH-метр (напр., И-160МИ, ЭВ-74), автоматическая или	Средняя: трудоемкий процесс, требующий точной	[15], [16], [49]

Метод анализа	Принцип измерения	Диапазон СД, %	Преимущества	Ограничения и недостатки	Тип оборудования	Сложность выполнения	Источник
	(прямое или обратное) раствором щелочи (NaOH) с фиксацией точек перегиба кривой рН.		количественное определение аминокрупп; высокая воспроизводимость.	углекислому газу; длительность растворения полимера; влияние вязкости раствора на точность.	ручная бюретка, магнитная мешалка.	калибровки электродов, проведения холостых опытов и построения графиков.	
Кондуктометрическое титрование	Измерение электропроводности раствора в процессе титрования аминокрупп щелочью для определения точек эквивалентности.	Широкий (для растворимых образцов)	Четкие точки перегиба на кривых даже при плохой видимости на рН - кривых; простота используемого оборудования.	Высокая чувствительность к присутствию посторонних электролитов (солей) и примесей в растворе.	Кондуктометр, автоматическая бюретка, магнитная мешалка.	Средняя: требует контроля ионной чистоты и аккуратности при добавлении титранта.	[16], [21], [31], [50]
УФ-спектроскопия (в т.ч. метод первой производной)	Измерение поглощения N - ацетильных групп (хромофоров) в области ~190 – 215 нм; использование производной позволяет исключить влияние фона.	0 – 100	Высокая чувствительность к малым концентрациям; возможность мониторинга процессов в реальном времени; минимальное влияние примесей белков (для метода производной).	Необходимость построения калибровочных кривых; помехи от посторонних хромофоров и растворителей; чувствительность к рН среды.	УФ-ВИЗ спектрофотометр (например, Shimadzu 2100, Genesys 10 UV).	Средняя: требует точного приготовления растворов и многократных разбавлений.	[13], [24], [27], [35]
Кислотный гидролиз с ВЭЖХ	Определение количества уксусной кислоты, выделившейся при полном термическом гидролизе образца.	0 – 100	Высокая воспроизводимость; применим для полностью нерастворимых форм хитина.	Длительная и жесткая пробоподготовка (гидролиз при 155 °С в ампулах); сложность хроматографического разделения.	Жидкостный хроматограф (ВЭЖХ), термостат.	Высокая: длительный термический процесс и сложная очистка проб.	[13]

Метод анализа	Принцип измерения	Диапазон СД, %	Преимущества	Ограничения и недостатки	Тип оборудования	Сложность выполнения	Источник
Рентгеновская дифракция	Корреляция между индексом кристалличности (CrI_{020}) и степенью деацетилирования.	17 – 94	Неразрушающий метод; высокая скорость анализа; не требует химических реагентов.	Сильная зависимость от предыстории обработки образца и его морфологии; требует высокой гомогенности СД.	Рентгеновский дифрактометр.	Средняя: требуется тонкое измельчение порошка и специализированное программное обеспечение.	[48]

3.2. Определение молекулярной массы хитозана

Молекулярная масса (ММ) является вторым по значимости параметром после СД, так как она критически определяет физико-химическое поведение, реологические свойства и биологическую активность полимера [21]. Определение точной ММ хитозана представляет собой сложную задачу из-за его природной полидисперсности, склонности макромолекул к самоассоциации в растворах. Для решения этой задачи чаще всего применяются методы вискозиметрии и гель-проникающей хроматографии.

3.2.1. Вискозиметрия

Вискозиметрический метод является наиболее распространенным, быстрым и доступным способом оценки ММ хитозана в лабораторной и заводской практике. Метод относится к относительным и основан на измерении вязкости разбавленных растворов полимера с последующим расчетом характеристической вязкости η .

Расчет средневязкостной ММ ($M\eta$) проводится по эмпирическому уравнению Марка–Куна–Хаувинка $\eta = KM^a$ [51]. Параметры K и a не являются универсальными; они зависят от температуры, природы растворителя (рН, ионная сила) и, что особенно важно для хитозана, от его СД. Ванг и соавторы [51] предложили использовать функциональные соотношения для констант k и α в зависимости от СД хитозана при растворении хитозана в водном растворе 0,2 М $\text{CH}_3\text{COOH}/0,1$ М CH_3COONa при 30°C. Авторы предложили вычислять константы для хитозана следующим образом: $k = 1,64 \times 10^{-30} \times \text{СД}(\%)^{14}$ (мл/г); $\alpha = -1,02 \times 10^{-2} \times \text{СД}(\%) + 1,82$.

В кислых растворах хитозан ведёт себя как катионный полиэлектролит, что приводит к изменению конформации цепей и влияет на результаты вискозиметрических измерений [7], [51]. Метод дает значение средневязкостной ММ, которое обычно лежит между среднечисленной (M_n) и среднемассовой (M_w) молекулярными массами [45]. Точность метода напрямую зависит от правильного выбора констант K и a для конкретной системы «растворитель–полимер» [51].

3.2.2. Гель-проникающая хроматография

Гель-проникающая хроматография — это эффективный метод, позволяющий определить не только средние значения молекулярных масс (M_w , M_n), но и характер молекулярно-массового распределения и индекс полидисперсности ($I_p = M_w/M_n$) [16].

Разделение макромолекул в колонке, заполненной пористым гелем, происходит по их гидродинамическому объему (размеру в растворе) [22]. Разделение основано на различиях гидродинамического объёма макромолекул в растворе: более крупные элюируют раньше, чем мелкие. В традиционной ГПХ с одним концентрационным детектором используются калибровочные кривые по стандартам с узким распределением (например, декстранам или белкам) [21]. Основное ограничение метода связано с различием конформации стандартов и анализируемого полимера, что влияет на точность калибровки.

Использование ГПХ в сочетании с детекторами по светорассеянию и вискозиметрическими детекторами позволяет преодолеть ограничения калибровки и определять точные значения ММ независимо от состава стандартов [45]. Такие системы также позволяют изучать степень разветвленности и конформацию макромолекул. Обобщение методов определения ММ хитозана представлено в таблице 4.

Таблица 4 - Методы определения молекулярной массы полимеров

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.10.1.13>

Метод анализа	Определяемый параметр (ММ/Полидисперсность)	Приборное обеспечение	Используемые растворители/реагенты	Диапазон применимости (СД)	Преимущества и ограничения	Источник
Светорассеяние	Абсолютная молекулярная масса (M_w), радиус инерции (R_g), размер частиц, полидисперсность	Фотомеры (Fica 50, PG-21), детекторы MALLS Dawn (Wyatt), Zetasizer Nano ZS	0.2 M NaCl, 0.3 M AcOH / 0.2 M AcONa	Широкий диапазон СД; для разбавленных систем	Абсолютный метод; не требует калибровки; высокая чувствительность к пыли, микрогелям и агрегации	[18], [21], [40], [51]
Вискозиметрия	Средневязкостная молекулярная масса (M_η), характеристическая вязкость	Вискозиметры Уббелоде, капиллярные (Anton Paar Lovis 2000M), ротационные (Reotest-2M, Fungilab Smart L)	Ацетатный буфер, уксусная кислота (0.1–0.5 M) с NaCl или ацетатом натрия	Широкий диапазон; вязкость растет с увеличением СД	Простейший и быстрый метод; требует знания констант К и α (уравнение Марка-Куна-Хаувинка)	[40], [51], [52], [53]
Гель-проникающая хроматография	Молекулярная масса (M_n , M_w , M_z), индекс полидисперсности (I_p), распределение ММ	Жидкостный хроматограф (напр. Agilent 1260, Sykam S2100), колонки Shodex OHраК, рефрактометр	Уксусная кислота (50 мМ), трис-НCl буфер, ацетат аммония (pH 5.1)	Удобен для ММ < 200 кДа; СД > 70%	Единственный метод для определения ММР; точность зависит от калибровки; возможна агрегация при низком СД	[16], [21], [40], [45]
Гель-электрофорез	Молекулярная масса (экспресс-анализ)	Система GelDoc EZ, источник напряжения	Агароза, ТАЕ-буфер, краситель Кумасси R250	ММ от 25 до 1000 кДа	Быстрый метод; не требует дорогого оборудования; оценка композиционной неоднородности	[22]

Метод анализа	Определяемый параметр (ММ/Полидисперсность)	Приборное обеспечение	Используемые растворители/реагенты	Диапазон применимости (СД)	Преимущества и ограничения	Источник
Мембранная осмометрия	Среднечисленная молекулярная масса (M_n), полидисперсность	Осмометр Melabs (SM2), мембраны Sartorius	0.2 M NaCl, 25°C	Полностью деацетилованный хитозан	Нечувствителен к крупным агрегатам; позволяет рассчитать соотношение M_w/M_n	[18]
Ультрацентрифугирование	Молекулярная масса, степень полидисперсности, гомогенность	Аналитическая ультрацентрифуга	Растворы полисахаридов	Не указано	Позволяет судить о гомогенности по числу пиков на седиментационной кривой	[52]
Масс-спектрометрия	Молекулярная масса олигомеров	Масс-спектрометр с лазерной десорбцией	Матрицы (например, DHB)	От 700 до 20000 Да	Наиболее точные данные для низкомолекулярных образцов (олигомеров)	[16]

3.3. Конформации, размер частиц, заряд

В растворах хитозан проявляет поведение катионного полиэлектролита, что определяет его конформацию, размер частиц и зарядовые характеристики. Протонирование аминогрупп приводит к возникновению электростатического отталкивания между цепями и разворачиванию макромолекулярного клубка [54], [55]. В растворе хитозан ведёт себя как полужёсткоцепной полимер с конформационной изменчивостью макромолекул [20]. В твердом состоянии хитозан способен принимать различные спиральные конформации, стабилизированные системой внутри- и межмолекулярных водородных связей [11].

3.3.1. Динамическое светорассеяние

Динамическое светорассеяние используется для определения размеров частиц и макромолекулярных клубков в растворе [56], [57]. В основе метода лежит анализ флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения, обусловленные броуновским движением частиц. На основе анализа автокорреляционной функции определяется коэффициент диффузии (D), который затем пересчитывается в гидродинамический радиус частиц по уравнению Эйнштейна – Стокса. Метод позволяет проводить измерения без сложной пробоподготовки и сохраняет нативную структуру образца.

3.3.2. ζ -потенциал

ζ -потенциал характеризует заряд поверхности и стабильность коллоидных систем хитозана [58]. Он определяется как потенциал на «поверхности скольжения» при движении фаз вследствие разрыва двойного электрического слоя (ДЭС) [59]. Чем выше абсолютное значение ζ -потенциала, тем сильнее силы электростатического отталкивания между частицами, что препятствует их коагуляции [58]. Системы со значениями потенциала более ± 30 мВ традиционно считаются устойчивыми. Поскольку хитозан содержит первичные аминогруппы с $pK_a \approx 6,3$, его суммарный заряд и, следовательно, ζ -потенциал критически зависят от pH раствора [16]. При низких pH потенциал положителен и велик, а при приближении к нейтральным значениям он снижается, что часто приводит к потере растворимости и агрегации полимера.

Основным методом является электрофоретическое рассеяние света, основанное на доплеровском сдвиге рассеянного лазерного излучения в электрическом поле [58]. Также применяются методы микроэлектрофореза (наблюдение за треками частиц под микроскопом) и электроакустические методы для концентрированных систем. Комплексное использование методов светорассеяния и измерения ζ -потенциала позволяет не только точно охарактеризовать физическое состояние макромолекул хитозана, но и прогнозировать поведение биоматериалов на его основе в физиологических средах.

3.4. Термические свойства

Термогравиметрический анализ (ТГА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) позволяют оценить термическую стабильность, содержание влаги и процессы деструкции хитозана. Традиционно процесс термического разложения хитозана протекает в два основных этапа, параметры которых существенно зависят от СД и ММ полимера [43], [60].

1. Первый этап (дегидратация) наблюдается в интервале температур 50–100°C (с максимумом около 60–95°C) и проявляется в виде эндотермического пика на кривой ДСК [61]. Этот процесс связан с испарением адсорбированной и слабо связанной воды, при этом потеря массы обычно составляет 5–13%.

2. Второй этап (термическая деструкция) начинается в диапазоне 210–300°C и характеризуется интенсивной потерей массы (до 45–50%) [31]. Это сопровождается деградацией пиранозных колец, разрывом гликозидных связей и выделением летучих продуктов. Полное термическое разложение макромолекулы завершается в интервале 350–480°C.

Температура начала разложения хитозана напрямую коррелирует с его химическим составом. С увеличением СД (удалением ацетильных групп) начальная температура термической деградации закономерно снижается, так как деацетилированные домены менее стабильны при нагревании, чем ацетилированные фрагменты. Таким образом, термический анализ является не только методом оценки термостойкости, но и косвенным инструментом для подтверждения структурных особенностей хитозана.

Заключение

Проведенный анализ подтверждает, что хитозан представляет собой семейство структурно неоднородных природных полимеров, физико-химические свойства которых определяются степенью деацетилирования, молекулярной массой, конформационным состоянием и надмолекулярной организацией цепей.

Показано, что ЯМР-спектроскопия является референсным методом («золотым стандартом») определения степени деацетилирования, тогда как корректная оценка ММ требует сочетания вискозиметрии, гель-проникающей хроматографии и методов светорассеяния для учета полидисперсности и конформационных эффектов. Дополнительно установлено, что методы термического анализа, рентгенофазового анализа, а также измерения ζ -потенциала и гидродинамических характеристик позволяют более полно охарактеризовать коллоидное состояние, размеры частиц, заряд и агрегационную стабильность систем на основе хитозана.

В совокупности результаты показывают, что наиболее достоверная характеристика хитозана достигается при использовании взаимодополняющих аналитических подходов, учитывающих его полиэлектролитную природу и склонность к структурной перестройке в растворах.



Благодарности

Автор выражает благодарность к.х.н., доценту кафедры общей и неорганической химии факультета физико-математических и естественных наук РУДН Курасовой М.Н., а также д.х.н., профессору департамента экологии человека и биоэлементологии института экологии РУДН Критченкову А.С. за оказанную помощь и поддержку в разработке данной проблематики.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The author expresses their gratitude to Kurasova M.N., Doctor of Chemistry and Associate Professor of the Faculty of General and Inorganic Chemistry, Department of Physics, Mathematics and Natural Sciences, PFUR, as well as to Kritchenkov A.S., Doctor of Chemistry and Professor in the Department of Human Ecology and Bioelementology at the Institute of Ecology, PFUR, for their assistance and support in the development of this research.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Kabanov V.L. Chitosan Application in Food Technology: A Review of Recent Advances / V.L. Kabanov, L.V. Novinyuk // Food systems. — 2020. — 1. — P. 10–15. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42615242> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.21323/2618-9771-2020-3-1-10-15
2. Куликов С.Н. Роль структуры в биологической активности хитозана / С.Н. Куликов, Ю.А. Тюрин, Д.А. Долбин и др. // Вестник Казанского Технологического Университета. — 2007. — 6. — С. 11–16. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10227889> (дата обращения: 07.06.26).
3. Egorov A.R. Chitosan-Based Ciprofloxacin Extended Release Systems: Combined Synthetic and Pharmacological (*In Vitro* and *In Vivo*) Studies / A.R. Egorov, A.V. Kurliuk, V.V. Rubanik et al. // Molecules. — 2022. — 24. — P. 8865. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36557998> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3390/molecules27248865
4. Egorov A.R. New Antibacterial and Antioxidant Chitin Derivatives: Ultrasonic Preparation and Biological Effects / A.R. Egorov, O.M. Khubiev, R.A. Golubev et al. // Polymers (Basel). — 2024. — 17. — P. 2509. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39274141> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3390/polym16172509
5. Kritchenkov A.S. Ultrasound-assisted catalyst-free thiol-yne click reaction in chitosan chemistry: Antibacterial and transfection activity of novel cationic chitosan derivatives and their based nanoparticles / A.S. Kritchenkov, A.R. Egorov, A.A. Artemjev et al. // Int J Biol Macromol. — 2020. — 143. — P. 143–152. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31805332> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.241
6. Вохидова Н.Р. Полимерные металлические системы хитозана *Bombyx mori* / Н.Р. Вохидова, С.Ш. Рашидова. — Ташкент: Фан, 2016. — 128 с.
7. Гальбрайт Л.С. Хитин и хитозан: строение, свойства, применение / Л.С. Гальбрайт // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — 1. — С. 51–56.
8. Ахымбетова Г.Д., Структурные исследования хитинов и хитозанов из разных источников / Г.Д., Ахымбетова, Б.П. Карлыбаева, Н.Д. Карева и др. // Universum: химия и биология. — 2022. — 12-2(102). — С. 46–53. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49961831> (дата обращения: 07.06.26). — DOI: 10.32743/UniChem.2022.102.12.14520
9. Халимов Р.И. Об отдельных аспектах характеристики образцов хитозана в биомедицинских исследованиях / Р.И. Халимов, Н.А. Омелько, Е.Е. Русин // Научное обозрение. Биологические науки. — 2022. — 4. — С. 122–130. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50106746> (дата обращения: 07.06.26). — DOI: 10.17513/srbs.1305
10. Попова Э.В. Биологическая активность хитозана с разной молекулярной массой / Э.В. Попова, Н.С. Домнина, Н.М. Коваленко и др. // Вестник защиты растений. — 2017. — 3. — С. 28–33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30079318> (дата обращения: 07.06.26).
11. Баклагина Ю.Г. Полиморфные модификации хитозана / Ю.Г. Баклагина, В.В. Клечковская, С.В. Кононова и др. // Кристаллография. — 2018. — 3. — С. 341–352. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34970820> (дата обращения: 07.06.26). — DOI: 10.7868/s0023476118030013
12. Курченко В.П. Технологические основы получения хитина и хитозана из насекомых / В.П. Курченко, С.В., Буга, Н.В. Петрашкевич и др. // Труды БГУ. — 2016. — 1. — С. 110–126. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37230712> (дата обращения: 07.06.26).
13. Кучина Ю.А. Инструментальные методы определения степени деацетилования хитина / Ю.А. Кучина, Н.В. Долгопятюва, В.Ю. Новиков и др. // Вестник Мурманского Государственного Технического Университета. — 2012. — 15. — С. 107–113. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20502024> (дата обращения: 07.06.26).
14. Czechowska-Biskup R. Determination of degree of deacetylation of chitosan — Comparison of methods / R. Czechowska-Biskup, D. Jarosińska, B. Rokita et al. // Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives. — 2012. — 17. — P. 5–20. — URL: https://www.researchgate.net/publication/288104933_Determination_of_degree_of_deacetylation_of_chitosan_-_Comparison_of_methods (accessed: 07.06.26).
15. Balazs N. Limitations of pH-potentiometric titration for the determination of the degree of deacetylation of chitosan / N. Balazs, P. Sipos // Carbohydr Res. — 2007. — 1. — P. 124–130. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17145045> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2006.11.016



16. Varlamov V.P. Chitin/Chitosan and Its Derivatives: Fundamental Problems and Practical Approaches / V.P. Varlamov, A.V. Il'ina, B.T. Shagdarova et al. // *Biochemistry (Mosc)*. — 2020. — Suppl 1. — P. S154–S176. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32087058> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1134/S0006297920140084
17. Van De Velde K. Structure analysis and degree of substitution of chitin, chitosan and dibutylchitin by FT-IR spectroscopy and solid state C NMR / K. Van De Velde, P. Kiekens // *Carbohydrate Polymers*. — 2004. — 4. — P. 409–416. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12259959> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.08.004
18. Domard A. Preparation and characterization of fully deacetylated chitosan / A. Domard, M. Rinaudo // *International Journal of Biological Macromolecules*. — 1983. — 1. — P. 49–52. — DOI: 10.1016/0141-8130(83)90078-8
19. Григорьева Е.В. Комплексная переработка балтийского гаммаруса с целью получения хитина, хитозана и белкового гидролизата / Е.В. Григорьева, О.Я. Мезенова // *Известия вузов. Пищевая технология*. — 2007. — 1. — С. 30–32. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12832580> (дата обращения: 07.06.26).
20. Козырева Е.В. Особенности физико-химических свойств растворов хитозана / Е.В. Козырева, А.Ю. Абрамов, А.Б. Шиповская // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. — 2011. — 2. — С. 25–31. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17574932> (дата обращения: 07.06.26).
21. Lyalina T. Correlation Analysis of Chitosan Physicochemical Parameters Determined by Different Methods / T. Lyalina, A. Zubareva, S. Lopatin et al. // *Organic & Medicinal Chemistry International Journal*. — 2017. — 3. — URL: <https://juniperpublishers.com/omcij/OMCIJ.MS.ID.555562.php> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.19080/omcij.2017.01.555562
22. Konovalova M. Express Analysis of Chitosan and Its Derivatives by Gel Electrophoresis / M. Konovalova, B.T. Shagdarova, V. Zubov et al. // *Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives*. — 2019. — XXIV. — P. 84–95. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41706333> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.15259/pcacd.24.007
23. Hirai A. Determination of degree of deacetylation of chitosan by ¹H NMR spectroscopy / A. Hirai, H. Odani, A. Nakajima // *Polymer Bulletin*. — 1991. — 1. — P. 87–94. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52844192> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1007/bf00299352
24. Sanchez-Machado D.I. Measurement of the degree of deacetylation in chitosan films by FTIR, (1)H NMR and UV spectrophotometry / D.I. Sanchez-Machado, J. Lopez-Cervantes, A.A. Escarcega-Galaz et al. // *MethodsX*. — 2024. — 12. — P. 102583. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38313694> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.mex.2024.102583
25. Николаев А.А. Методы деацетилирования хитозана: сравнительный анализ и практические рекомендации / А.А. Николаев // *Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии»*. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2025. — С. 220–226. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82929942> (дата обращения: 07.06.26).
26. Abou-Shoer M. A Simple Colorimetric Method for the Evaluation of Chitosan / M. Abou-Shoer // *American Journal of Analytical Chemistry*. — 2010. — 2. — P. 91–94. — DOI: 10.4236/ajac.2010.12012
27. Tan S.C. The degree of deacetylation of chitosan: advocating the first derivative UV-spectrophotometry method of determination / S.C. Tan, E. Khor, T.K. Tan et al. // *Talanta*. — 1998. — 4. — P. 713–9. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18967053> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/s0039-9140(97)00288-9
28. Brugnerotto J. An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization / J. Brugnerotto, J. Lizardi, F.M. Goycoolea et al. // *Polymer*. — 2001. — 8. — P. 3569–3580. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=547443> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00713-8
29. Николаев А.А. Определение степени деацетилирования хитозана методами ИК и ЯМР / А.А. Николаев, М.Н. Курасова, А.С. Критченков // *IX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Химические проблемы современности»*. — Донецк: Донецкий государственный университет, 2025. — С. 195–196. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82615745> (дата обращения: 07.06.26).
30. Pavlova O.V. Qualitative and physical-chemical indicators of chitosan samples and their comparative characteristics with imported analogues / O.V. Pavlova, S.S. Anufrik, E.I. Eismont et al. // *Modern Science and Innovations*. — 2024. — 4 (48). — P. 60–72. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80433793> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.37493/2307-910x.2024.4.6
31. Dziedzic I. Methods of Chitosan Identification: History and Trends / I. Dziedzic, A. Kertmen // *Letters in Applied NanoBioScience*. — 2022. — 4. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=57441880> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.33263/ianbs124.094
32. Федосов П.А., Обоснование выбора компонентов и их совместимости для разработки ранозаживляющего геля на основе хитозана / П.А., Федосов, С.И. Провоторова, А.И. Сливкин и др. // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2015. — 9-4(40). — С. 83–85. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=UWPGFL> (дата обращения: 07.06.26).
33. Kasaai M. A review of several reported procedures to determine the degree of N-acetylation for chitin and chitosan using infrared spectroscopy / M. Kasaai // *Carbohydrate Polymers*. — 2008. — 4. — P. 497–508. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12261097> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.07.009
34. Duarte M.L. An optimised method to determine the degree of acetylation of chitin and chitosan by FTIR spectroscopy / M.L. Duarte, M.C. Ferreira, M.R. Marvao et al. // *Int J Biol Macromol*. — 2002. — 1-3. — P. 1–8. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12559421>. (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/s0141-8130(02)00039-9
35. Khan T.A. Reporting degree of deacetylation values of chitosan: the influence of analytical methods / T.A. Khan, K.K. Peh, H.S. Ch'ng // *J Pharm Pharm Sci*. — 2002. — 3. — P. 205–1. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12553887> (accessed: 07.06.26).



36. Berdimbetova G.E. Synthesis and Characteristics of Carboxymethylchitosan from the *Artemia Parthenogenetica* Cyst of the Aral Sea / G.E. Berdimbetova, A.S. Boymirzaev, B.P. Karlibaeva // Theoretical & Applied Science. — 2022. — 12. — P. 480–492. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50293867> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.15863/tas.2022.12.116.37
37. Raimundo N.L.J. Chitosan and Carboxymethylchitosan as High Turbidity Water Biocoagulants / N.L.J. Raimundo, L.I.O.A. João, d.A. Jones et al. // Journal of Renewable Materials. — 2020. — 11. — P. 1489–1504. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77143602> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.32604/jrm.2020.011629
38. Huang R.Y.M. N-acetylated chitosan membranes for the pervaporation separation of alcohol/toluene mixtures / R.Y.M. Huang, G.Y. Moon, R. Pal // Journal of Membrane Science. — 2000. — 2. — P. 223–231. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12354898> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S0376-7388(00)00443-9
39. Lim S.H. Synthesis and antimicrobial activity of a water-soluble chitosan derivative with a fiber-reactive group / S.H. Lim, S.M. Hudson // Carbohydr Res. — 2004. — 2. — P. 313–9. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14698889> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2003.10.024
40. Rinaudo M. Characterization of chitosan. Influence of ionic strength and degree of acetylation on chain expansion / M. Rinaudo, M. Milas, P. Le Dung // Int J Biol Macromol. — 1993. — 5. — P. 281–5. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8251442> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/0141-8130(93)90027-j
41. Kasaai M.R. The use of intense femtosecond laser pulses for the fragmentation of chitosan / M.R. Kasaai, J. Arul, S.L. Chin et al. // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. — 1999. — 3. — P. 201–205. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=109183> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S1010-6030(98)00432-8
42. Lavertu M. A validated ¹H NMR method for the determination of the degree of deacetylation of chitosan / M. Lavertu, Z. Xia, A.N. Serreği et al. // J Pharm Biomed Anal. — 2003. — 6. — P. 1149–58. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12907258> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S0731-7085(03)00155-9
43. Barbosa H.F.G. A new look towards the thermal decomposition of chitins and chitosans with different degrees of deacetylation by coupled TG-FTIR / H.F.G. Barbosa, D.S. Francisco, A.P.G. Ferreira et al. // Carbohydr Polym. — 2019. — 225. — P. 115232. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31521270> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115232
44. Петрова Ю.С. Константы устойчивости комплексов сульфозетилизованного хитозана с ионами щелочноземельных и переходных металлов / Ю.С. Петрова, Л.К. Неудачина // Международный научно-исследовательский журнал. — 2012. — 5-2(5). — С. 42–43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=PNCMGB> (дата обращения: 07.06.26).
45. Липин В.А. Теоретические и экспериментальные методы исследования в химии полимеров / В.А. Липин, Т.Е. Горкина. — Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. — 69 с. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82363222> (дата обращения: 07.06.26).
46. Николаев А.А. Кристаллохимическое исследование полимерных координационных соединений на основе хитозана и биометаллов / А.А. Николаев, Е.П. Лопашина, А.А. Снегирёва // XII Межвузовская конференция научных работ студентов имени члена корреспондента АН СССР Александра Александровича Яковкина (с международным участием). — Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2023. — С. 113–115. — URL: https://www.researchgate.net/publication/375670386_Kristallohimiceskoe_issledovanie_polimernyh_koordinacionnyh_soedinenij_na_osnove_hitozana_i_biometallov (дата обращения: 07.06.26).
47. Ioelovich M. Crystallinity and Hydrophilicity of Chitin and Chitosan / M. Ioelovich // Research and Reviews: Journal of Chemistry. — 2014. — 3. — P. 7–14. — URL: https://www.researchgate.net/publication/306440667_Crystallinity_and_Hydrophilicity_of_Chitin_and_Chitosan (accessed: 07.06.26).
48. Zhang Y. Determination of the degree of deacetylation of chitin and chitosan by X-ray powder diffraction / Y. Zhang, C. Xue, Y. Xue et al. // Carbohydr Res. — 2005. — 11. — P. 1914–7. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15963961> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2005.05.005
49. Amamou O. Revisiting the Determination of the Degree of Deacetylation Using Potentiometric Titration: A New Equation for Modified Chitosan / O. Amamou, S. Kefil, J.P. Denis et al. // Molecules. — 2024. — 13. — P. 2962. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38998916> — DOI: 10.3390/molecules29132962
50. Hemmami H. Chitosan, Its Derivatives, Sources, Preparation Methods, and Applications: A Review / H. Hemmami, I. Ben Amor, A. Ben Amor et al. // Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry. — 2024. — 1. — P. 341–364. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65952368> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.18596/jotcsa.1336313
51. Wang W. Determination of the Mark-Houwink equation for chitosans with different degrees of deacetylation / W. Wang, S.Q. Bo, S.Q. Li et al. // Int J Biol Macromol. — 1991. — 5. — P. 281–5. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1801901> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/0141-8130(91)90027-r
52. Шиповская А.Б. Методы выделения и физико-химические свойства природных полисахаридов / А.Б. Шиповская. — Саратов: Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 2015. — 64 с.
53. Реут К.В. Оптическая активность и спектрофотометрические характеристики растворов хитозана, полученного из камчатского краба и арктической креветки / К.В. Реут, Н.В. Долгопятова, В.Ю. Новиков и др. // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2013. — 3. — С. 580–585. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20647133> (дата обращения: 07.06.26).
54. Николаев А.А. Коллоидные характеристики металл-биополимерных систем на основе хитозан / А.А. Николаев, А.А. Годзишевская, А.С., Критченков и др. // VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Химические проблемы современности». — Донецк: Донецкий национальный университет, 2023. — С. 121. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54145332&pff=1> (дата обращения: 07.06.26).



55. Николаев А.А. Коллоидообразование металлокомплексных дисперсий на основе хитозана / А.А. Николаев, М.Н. Курасова, А.С. Критченков // Всероссийская с международным участием школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Материалы и технологии XXI века». — Казань: Школа, 2024. — С. 184. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80363589> (дата обращения: 07.06.26).
56. Carvalho P.M. Application of Light Scattering Techniques to Nanoparticle Characterization and Development / P.M. Carvalho, M.R. Felicio, N.C. Santos et al. // Front Chem. — 2018. — 6. — P. 237. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29988578> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3389/fchem.2018.00237
57. Бочаров К.В. Методы статического и динамического рассеяния света для исследования наночастиц и макромолекул в растворах / К.В. Бочаров, Н.И. Марукович, А.Ю. Куксин. — Москва: МФТИ, 2016. — 40 с.
58. Belenkii D. Measurement of the zeta potential. Brief review of the main methods / D. Belenkii, D. Balakhanov, E. Lesnikov // Analytics. — 2017. — 3. — P. 82–8. — DOI: 10.22184/2227-572x.2017.34.3.82.89
59. Потенциал электрокинетический (ζ -потенциал) частиц в коллоидных системах. Оптические методы измерения. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 8.887-2015. — Москва: Стандартинформ, 2015.
60. Николаев А.А. Термический анализ металлокомплексов на основе хитозана и марганца / А.А. Николаев, А.В. Митрофанова, Е.А. Фортальнова и др. // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025». — Москва: Перо, 2025. — С. 169. — URL: https://lomonosov2025.chem.msu.ru/uploads/proceedings_chemlomo2025.pdf (дата обращения: 07.06.26).
61. Pereira F.S. Thermal and morphological study of chitosan metal complexes / F.S. Pereira, S. Lanfredi, E.R.P. González et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2017. — 1. — P. 291–301. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31916529> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1007/s10973-017-6146-2

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kabanov V.L. Chitosan Application in Food Technology: A Review of Recent Advances / V.L. Kabanov, L.V. Novinyuk // Food systems. — 2020. — 1. — P. 10–15. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42615242> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.21323/2618-9771-2020-3-1-10-15
2. Kulikov S.N. Rol' struktury v biologicheskoy aktivnosti xitozana [The role of structure in the biological activity of chitosan] / S.N. Kulikov, Yu.A. Tyurin, D.A. Dolbin et al. // Bulletin of Kazan Technological University. — 2007. — 6. — P. 11–16. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10227889> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
3. Egorov A.R. Chitosan-Based Ciprofloxacin Extended Release Systems: Combined Synthetic and Pharmacological (*In Vitro* and *In Vivo*) Studies / A.R. Egorov, A.V. Kurliuk, V.V. Rubanik et al. // Molecules. — 2022. — 24. — P. 8865. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36557998> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3390/molecules27248865
4. Egorov A.R. New Antibacterial and Antioxidant Chitin Derivatives: Ultrasonic Preparation and Biological Effects / A.R. Egorov, O.M. Khubiev, R.A. Golubev et al. // Polymers (Basel). — 2024. — 17. — P. 2509. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39274141> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3390/polym16172509
5. Kritchenkov A.S. Ultrasound-assisted catalyst-free thiol-yne click reaction in chitosan chemistry: Antibacterial and transfection activity of novel cationic chitosan derivatives and their based nanoparticles / A.S. Kritchenkov, A.R. Egorov, A.A. Artemjev et al. // Int J Biol Macromol. — 2020. — 143. — P. 143–152. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31805332> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.241
6. Voxidova N.R. Polimernye metallicheskie sistemy xitozana Bombyx mori [Polymer Metal Chitosan Systems Bombyx mori] / N.R. Voxidova, S.Sh. Rashidova. — Tashkent: Fan, 2016. — 128 p. [in Russian]
7. Gal'brajx L.S. Xitin i xitozan: stroenie, svoystva, primeneniye [Chitin and chitosan: structure, properties, application] / L.S. Gal'brajx // Soros Educational Magazine. — 2001. — 1. — P. 51–56. [in Russian]
8. Axy'mbetova G.D., Strukturnye issledovaniya xitinov i xitozanov iz raznykh istochnikov [Structural studies of chitins and chitosans from various sources] / G.D., Axy'mbetova, B.P. Karlybaeva, N.D. Kareva et al. // Universum: Chemistry and Biology. — 2022. — 12-2(102). — P. 46–53. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49961831> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.32743/UniChem.2022.102.12.14520 [in Russian]
9. Xalimov R.I. Ob otdel'nykh aspektakh karakterizatsii obraztsov xitozana v biomeditsinskikh issledovaniyakh [On certain aspects of characterization of chitosan samples in biomedical research] / R.I. Xalimov, N.A. Omel'ko, E.E. Rusin // Scientific Review. Biological Sciences. — 2022. — 4. — P. 122–130. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50106746> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.17513/srbs.1305 [in Russian]
10. Popova E.V. Biologicheskaya aktivnost' xitozana s raznoy molekulyarnoy massoj [Biological activity of chitosan with different molecular weights] / E.V. Popova, N.S. Domnina, N.M. Kovalenko et al. // Bulletin of Plant Protection. — 2017. — 3. — P. 28–33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30079318> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
11. Baklagina Yu.G. Polimorfnyye modifikatsii xitozana [Polymorphic modifications of chitosan] / Yu.G. Baklagina, V.V. Klechkovskaya, S.V. Kononova et al. // Crystallography. — 2018. — 3. — P. 341–352. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34970820> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.7868/s0023476118030013 [in Russian]
12. Kurchenko V.P. Tekhnologicheskie osnovy polucheniya xitina i xitozana iz nasekomykh [Technological bases of obtaining chitin and chitosan from insects] / V.P. Kurchenko, S.V., Buga, N.V. Petrashkevich et al. // Proceedings of the BSU. — 2016. — 1. — P. 110–126. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37230712> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
13. Kuchina Yu.A. Instrumental'nyye metody opredeleniya stepeni deacetilirovaniya xitina [Instrumental methods for determining the degree of chitin deacetylation] / Yu.A. Kuchina, N.V. Dolgopyatova, V.Yu. Novikov et al. // Bulletin of the Murmansk State Technical University. — 2012. — 15. — P. 107–113. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20502024> (accessed: 07.06.26). [in Russian]



14. Czechowska-Biskup R. Determination of degree of deacetylation of chitosan — Comparison of methods / R. Czechowska-Biskup, D. Jarosińska, B. Rokita et al. // Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives. — 2012. — 17. — P. 5–20. — URL: https://www.researchgate.net/publication/288104933_Determination_of_degree_of_deacetylation_of_chitosan_-_Comparison_of_methods (accessed: 07.06.26).
15. Balazs N. Limitations of pH-potentiometric titration for the determination of the degree of deacetylation of chitosan / N. Balazs, P. Sipos // Carbohydr Res. — 2007. — 1. — P. 124–130. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17145045> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2006.11.016
16. Varlamov V.P. Chitin/Chitosan and Its Derivatives: Fundamental Problems and Practical Approaches / V.P. Varlamov, A.V. Il'ina, B.T. Shagdarova et al. // Biochemistry (Mosc). — 2020. — Suppl 1. — P. S154–S176. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32087058> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1134/S0006297920140084
17. Van De Velde K. Structure analysis and degree of substitution of chitin, chitosan and dibutylchitin by FT-IR spectroscopy and solid state C NMR / K. Van De Velde, P. Kiekens // Carbohydrate Polymers. — 2004. — 4. — P. 409–416. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12259959> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.08.004
18. Domard A. Preparation and characterization of fully deacetylated chitosan / A. Domard, M. Rinaudo // International Journal of Biological Macromolecules. — 1983. — 1. — P. 49–52. — DOI: 10.1016/0141-8130(83)90078-8
19. Grigor'eva E.V. Kompleksnaya pererabotka baltiyskogo gammarusa s cel'yu polucheniya xitina, xitozana i belkovogo gidrolizata [Complex processing of Baltic gammarus to produce chitin, chitosan and protein hydrolysate] / E.V. Grigor'eva, O.Ya. Mezenova // Proceedings of Universities. Food technology. — 2007. — 1. — P. 30–32. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12832580> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
20. Kozy'reva E.V. Osobennosti fiziko-khimicheskix svoystv rastvorov xitozana [Features of physico-chemical properties of chitosan solutions] / E.V. Kozy'reva, A.Yu. Abramov, A.B. Shipovskaya // Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Chemistry. Biology. Ecology. — 2011. — 2. — P. 25–31. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17574932> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
21. Lyalina T. Correlation Analysis of Chitosan Physicochemical Parameters Determined by Different Methods / T. Lyalina, A. Zubareva, S. Lopatin et al. // Organic & Medicinal Chemistry International Journal. — 2017. — 3. — URL: <https://juniperpublishers.com/omcij/OMCIJ.MS.ID.555562.php> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.19080/omcij.2017.01.555562
22. Konovalova M. Express Analysis of Chitosan and Its Derivatives by Gel Electrophoresis / M. Konovalova, B.T. Shagdarova, V. Zubov et al. // Progress on Chemistry and Application of Chitin and its Derivatives. — 2019. — XXIV. — P. 84–95. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41706333> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.15259/pcacd.24.007
23. Hirai A. Determination of degree of deacetylation of chitosan by ¹H NMR spectroscopy / A. Hirai, H. Odani, A. Nakajima // Polymer Bulletin. — 1991. — 1. — P. 87–94. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=52844192> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1007/bf00299352
24. Sanchez-Machado D.I. Measurement of the degree of deacetylation in chitosan films by FTIR, (¹H) NMR and UV spectrophotometry / D.I. Sanchez-Machado, J. Lopez-Cervantes, A.A. Escarcega-Galaz et al. // MethodsX. — 2024. — 12. — P. 102583. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38313694> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.mex.2024.102583
25. Nikolaev A.A. Metodi deatsetilirovaniya khitozana: sravnitel'nii analiz i prakticheskie rekomendatsii [Chitosan deacetylation methods: comparative analysis and practical recommendations] / A.A. Nikolaev // International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Applied Biotechnology and Engineering". — Orenburg: Orenburg State University, 2025. — P. 220–226. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82929942> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
26. Abou-Shoer M. A Simple Colorimetric Method for the Evaluation of Chitosan / M. Abou-Shoer // American Journal of Analytical Chemistry. — 2010. — 2. — P. 91–94. — DOI: 10.4236/ajac.2010.12012
27. Tan S.C. The degree of deacetylation of chitosan: advocating the first derivative UV-spectrophotometry method of determination / S.C. Tan, E. Khor, T.K. Tan et al. // Talanta. — 1998. — 4. — P. 713–9. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18967053> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/s0039-9140(97)00288-9
28. Brugnerotto J. An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization / J. Brugnerotto, J. Lizardi, F.M. Goycoolea et al. // Polymer. — 2001. — 8. — P. 3569–3580. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=547443> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00713-8
29. Nikolaev A.A. Opredelenie stepeni deatsetilirovaniya khitozana metodami IR i YaMR [Determination of the degree of chitosan deacetylation by IR and NMR methods] / A.A. Nikolaev, M.N. Kurasova, A.S. Kritchenkov // IX International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Chemical Problems of our time". — Donetsk: Donetsk State University, 2025. — P. 195–196. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82615745> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
30. Pavlova O.V. Qualitative and physical-chemical indicators of chitosan samples and their comparative characteristics with imported analogues / O.V. Pavlova, S.S. Anufrik, E.I. Eysymont et al. // Modern Science and Innovations. — 2024. — 4 (48). — P. 60–72. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80433793> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.37493/2307-910x.2024.4.6
31. Dziedzic I. Methods of Chitosan Identification: History and Trends / I. Dziedzic, A. Kertmen // Letters in Applied NanoBioScience. — 2022. — 4. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=57441880> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.33263/ianbs124.094
32. Fedosov P.A., Obosnovanie vy'bora komponentov i ix sovместимости dlya razrabotki ranozazhivlyayushhego gelya na osnove xitozana [Justification of the choice of components and their compatibility for the development of a chitosan-based



- wound healing gel] / P.A., Fedosov, S.I. Provotorova, A.I. Slivkin et al. // International Research Journal. — 2015. — 9-4(40). — P. 83–85. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=UWPGFL> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
33. Kasai M. A review of several reported procedures to determine the degree of N-acetylation for chitin and chitosan using infrared spectroscopy / M. Kasai // Carbohydrate Polymers. — 2008. — 4. — P. 497–508. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12261097> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.07.009
34. Duarte M.L. An optimised method to determine the degree of acetylation of chitin and chitosan by FTIR spectroscopy / M.L. Duarte, M.C. Ferreira, M.R. Marvao et al. // Int J Biol Macromol. — 2002. — 1-3. — P. 1–8. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12559421>. (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S0141-8130(02)00039-9
35. Khan T.A. Reporting degree of deacetylation values of chitosan: the influence of analytical methods / T.A. Khan, K.K. Peh, H.S. Ch'ng // J Pharm Pharm Sci. — 2002. — 3. — P. 205–1. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12553887> (accessed: 07.06.26).
36. Berdimbetova G.E. Synthesis and Characteristics of Carboxymethylchitosan from the Artemia Parthenogenetica Cyst of the Aral Sea / G.E. Berdimbetova, A.S. Boymirzaev, B.P. Karlibaeva // Theoretical & Applied Science. — 2022. — 12. — P. 480–492. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50293867> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.15863/tas.2022.12.116.37
37. Raimundo N.L.J. Chitosan and Carboxymethylchitosan as High Turbidity Water Biocoagulants / N.L.J. Raimundo, L.I.O.A. João, d.A. Jones et al. // Journal of Renewable Materials. — 2020. — 11. — P. 1489–1504. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=77143602> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.32604/jrm.2020.011629
38. Huang R.Y.M. N-acetylated chitosan membranes for the pervaporation separation of alcohol/toluene mixtures / R.Y.M. Huang, G.Y. Moon, R. Pal // Journal of Membrane Science. — 2000. — 2. — P. 223–231. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12354898> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S0376-7388(00)00443-9
39. Lim S.H. Synthesis and antimicrobial activity of a water-soluble chitosan derivative with a fiber-reactive group / S.H. Lim, S.M. Hudson // Carbohydr Res. — 2004. — 2. — P. 313–9. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14698889> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2003.10.024
40. Rinaudo M. Characterization of chitosan. Influence of ionic strength and degree of acetylation on chain expansion / M. Rinaudo, M. Milas, P. Le Dung // Int J Biol Macromol. — 1993. — 5. — P. 281–5. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8251442> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/0141-8130(93)90027-j
41. Kasai M.R. The use of intense femtosecond laser pulses for the fragmentation of chitosan / M.R. Kasai, J. Arul, S.L. Chin et al. // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. — 1999. — 3. — P. 201–205. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=109183> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S1010-6030(98)00432-8
42. Lavertu M. A validated ¹H NMR method for the determination of the degree of deacetylation of chitosan / M. Lavertu, Z. Xia, A.N. Serreqi et al. // J Pharm Biomed Anal. — 2003. — 6. — P. 1149–58. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12907258> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/S0731-7085(03)00155-9
43. Barbosa H.F.G. A new look towards the thermal decomposition of chitins and chitosans with different degrees of deacetylation by coupled TG-FTIR / H.F.G. Barbosa, D.S. Francisco, A.P.G. Ferreira et al. // Carbohydr Polym. — 2019. — 225. — P. 115232. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31521270> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115232
44. Petrova Yu.S. Konstanty' ustojchivosti kompleksov sul'foetilirovannogo xitozana s ionami shhelochnozemel'ny'x i perexodny'x metallov [Stability constants of sulfoethylated chitosan complexes with alkaline earth and transition metal ions] / Yu.S. Petrova, L.K. Neudachina // International Research Journal. — 2012. — 5-2(5). — P. 42–43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=PNCMGB> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
45. Lipin V.A. Teoreticheskie i eksperimentalnye metodi issledovaniya v khimii polimerov [Theoretical and experimental research methods in polymer chemistry] / V.A. Lipin, T.E. Gorkina. — Saint Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2021. — 69 p. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82363222> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
46. Nikolaev A.A. Kristallokhimicheskoe issledovanie polimernikh koordinatsionnykh soedinenii na osnove khitozana i biometallov [Crystal chemical investigation of polymer coordination compounds based on chitosan and biometals] / A.A. Nikolaev, Ye.P. Lopashinova, A.A. Snegiryova // XII Interuniversity Student Research Conference named after Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences Alexander Alexandrovich Yakovkin (with international participation). — Saint Petersburg: SPbGTI(TU), 2023. — P. 113–115. — URL: https://www.researchgate.net/publication/375670386_Kristallohimicheskoe_issledovanie_polimernyh_koordinatsionnykh_soedinenij_na_osnove_hitozana_i_biometallov (accessed: 07.06.26). [in Russian]
47. Ioelovich M. Crystallinity and Hydrophilicity of Chitin and Chitosan / M. Ioelovich // Research and Reviews: Journal of Chemistry. — 2014. — 3. — P. 7–14. — URL: https://www.researchgate.net/publication/306440667_Crystallinity_and_Hydrophilicity_of_Chitin_and_Chitosan (accessed: 07.06.26).
48. Zhang Y. Determination of the degree of deacetylation of chitin and chitosan by X-ray powder diffraction / Y. Zhang, C. Xue, Y. Xue et al. // Carbohydr Res. — 2005. — 11. — P. 1914–7. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15963961> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/j.carres.2005.05.005
49. Amamou O. Revisiting the Determination of the Degree of Deacetylation Using Potentiometric Titration: A New Equation for Modified Chitosan / O. Amamou, S. Kefil, J.P. Denis et al. // Molecules. — 2024. — 13. — P. 2962. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38998916> — DOI: 10.3390/molecules29132962
50. Hemmami H. Chitosan, Its Derivatives, Sources, Preparation Methods, and Applications: A Review / H. Hemmami, I. Ben Amor, A. Ben Amor et al. // Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry. — 2024. — 1. — P. 341–364. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65952368> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.18596/jotcsa.1336313



51. Wang W. Determination of the Mark-Houwink equation for chitosans with different degrees of deacetylation / W. Wang, S.Q. Bo, S.Q. Li et al. // *Int J Biol Macromol.* — 1991. — 5. — P. 281–5. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1801901> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1016/0141-8130(91)90027-r
52. Shipovskaya A.B. Metodi videleniya i fiziko-khimicheskie svoystva prirodnykh polisakharidov [Methods of isolation and physico-chemical properties of natural polysaccharides] / A.B. Shipovskaya. — Saratov: Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, 2015. — 64 p. [in Russian]
53. Reut K.V. Opticheskaya aktivnost' i spektrofotometricheskie xarakteristiki rastvorov xitozana, poluchennogo iz kamchatskogo kraba i arkticheskoy krevetki [Optical activity and spectrophotometric characteristics of chitosan solutions obtained from Kamchatka crab and Arctic shrimp] / K.V. Reut, N.V. Dolgopyatova, V.Yu. Novikov et al. // *Bulletin of the Moscow State Technical University. Proceedings of the Murmansk State Technical University.* — 2013. — 3. — P. 580–585. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20647133> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
54. Nikolaev A.A. Kolloidnye kharakteristiki metall-biopolimernykh sistem na osnove khitozan [Colloidal characteristics of metal-biopolymer systems based on chitosan] / A.A. Nikolaev, A.A. Godzishvskaya, A.S., Kritchenkov et al. // VII International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Chemical Problems of our time". — Donetsk: Donetsk National University, 2023. — P. 121. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54145332&pff=1> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
55. Nikolaev A.A. Kolloidoobrazovanie metallokompleksnykh dispersii na osnove khitozana [Colloidization of metal complex dispersions based on chitosan] / A.A. Nikolaev, M.N. Kurasova, A.S. Kritchenkov // All-Russian international school-conference of students, postgraduates and young scientists "Materials and Technologies of the XXI century". — Kazan: Shkola, 2024. — P. 184. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80363589> (accessed: 07.06.26). [in Russian]
56. Carvalho P.M. Application of Light Scattering Techniques to Nanoparticle Characterization and Development / P.M. Carvalho, M.R. Felicio, N.C. Santos et al. // *Front Chem.* — 2018. — 6. — P. 237. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29988578> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.3389/fchem.2018.00237
57. Bocharov K.V. Metody staticheskogo i dinamicheskogo rasseyaniya sveta dlya issledovaniya nanochastits i makromolekul v rastvorax [Static and dynamic light scattering methods for studying nanoparticles and macromolecules in solutions] / K.V. Bocharov, N.I. Marukovich, A.Yu. Kuksin. — Moscow: MFTI, 2016. — 40 p. [in Russian]
58. Belenkii D. Measurement of the zeta potential. Brief review of the main methods / D. Belenkii, D. Balakhanov, E. Lesnikov // *Analytics.* — 2017. — 3. — P. 82–8. — DOI: 10.22184/2227-572x.2017.34.3.82.89
59. Potencial elektrokineticheskij (ζ -potencial) chastic v kolloidnykh sistemakh. Opticheskie metody izmereniya. Nacional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii [Electrokinetic potential (ζ -potential) of particles in colloidal systems. Optical measurement methods. The national standard of the Russian Federation]. GOST R 8.887-2015. — Moscow: Standartinform, 2015. [in Russian]
60. Nikolaev A.A. Termicheskii analiz metallokompleksov na osnove khitozana i margantsa [Thermal analysis of metal complexes based on chitosan and manganese] / A.A. Nikolaev, A.V. Mitrofanova, Ye.A. Fortalnova et al. // International Scientific Conference of students, postgraduates and young Scientists "Lomonosov-2025". — Moscow: Pero, 2025. — P. 169. — URL: https://lomonosov2025.chem.msu.ru/uploads/proceedings_chemlomo2025.pdf (accessed: 07.06.26). [in Russian]
61. Pereira F.S. Thermal and morphological study of chitosan metal complexes / F.S. Pereira, S. Lanfredi, E.R.P. González et al. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* — 2017. — 1. — P. 291–301. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31916529> (accessed: 07.06.26). — DOI: 10.1007/s10973-017-6146-2