

Молочная сыворотка в 3DP: обзор предметного поля

Е.И. Большакова¹, Наташа Поклар Ульрих²

¹ Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности,
г. Москва, Российская
Федерация

² Университет Любляны,
Любляна, Республика Словения

АННОТАЦИЯ

Введение: Проблема утилизации молочной сыворотки остается актуальной, несмотря на развитие современных технологий переработки, таких как мембранные методы, биотехнологические подходы и консервирование. Глобальное производство сыворотки превышает 160 млн тонн в год и продолжает расти, что требует поиска новых решений в рамках концепции циркуляционной экономики. В последние годы технологии Индустрии 4.0, включая 3D-печать (3DP), привлекают внимание как перспективный инструмент для переработки побочных продуктов молочной промышленности. Однако адаптация сывороточных белковых продуктов для 3DP требует дополнительного изучения их свойств и методов модификации.

Целью настоящего обзора предметного поля стало изучение и анализ потенциала и текущего применения белковых продуктов переработки молочной сыворотки, как компонентов в составе чернил для 3DP.

Материалы и методы: Обзор выполнен в соответствии с руководством PRISMA-ScR. Поиск литературы проведен в ScienceDirect, Scopus и PubMed (2010–2025 гг.) с использованием целевых ключевых запросов. Для анализа структуры предметного поля использован VOSViewer.

Результаты: Анализ 56 отобранных источников показал, что сывороточные белковые компоненты (в 76% случаях WPI) активно исследуются в качестве ингредиентов для разработки 3DP чернил. Их потенциальное применение охватывает производство пищевых продуктов, включая функциональное и персонализированное питание (в том числе для людей с дисфагией), а также биомедицину, тканевую инженерию и химическую промышленность. Основное внимание исследователей в данном поле уделено изучению реологических, текстурных и микроструктурных характеристик разрабатываемых 3DP материалов, а также методов их модификации: изменения состава рецептур, технологической обработки до 3DP (регулирование pH, тепловая и механическая обработка) и после нее (сушка, карбонизация, СВЧ).

Выводы: Результаты обзора подтверждает перспективность применения сывороточных белков в составе материалов для 3DP. В качестве рекомендаций по развитию исследований в данном поле авторы предлагают уделить внимание систематизации накопленных знаний по ключевым компонентам в комбинации с сывороточными белками, прогностическому моделированию оптимальных комбинаций компонентов в рецептуре 3DP материалов, базируясь на их способности к межмолекулярным взаимодействиям и значимым свойствам, а также внедрению других сывороточных белковых ингредиентов, например гидролизатов, в активное использование для 3DP.

Ключевые слова: 3D-печать, молочная сыворотка, чернила для 3D-печати, свойства чернил для 3D печати

Корреспонденция:

Екатерина Ивановна
Большакова

E-mail:
ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 09.01.2025

Принята: 15.06.2025

Опубликована: 30.06.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Большакова, Е.И., & Поклар Ульрих, Н. (2025). Молочная сыворотка в 3DP: обзор предметного поля. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 158–184.
<https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>

Whey in 3D Printing: A Scoping Review

Ekaterina I. Bolshakova¹, Natasha Poklar Ulrich²

¹ All-Russian Dairy Research
Institute, Moscow, Russian
Federation

² University of Ljubljana, Ljubljana,
Republic of Slovenia

ABSTRACT

Introduction: The issue of dairy whey utilization remains relevant despite advancements in modern processing technologies such as membrane methods, biotechnological approaches, and preservation. Global whey production exceeds 160 million tons annually and continues to grow, necessitating new solutions within the circular economy framework. In recent years, Industry 4.0 technologies, including 3D printing (3DP), have emerged as promising tools for processing dairy by-products. However, adapting whey protein products for 3DP requires further investigation of their properties and modification methods.

Purpose: This scoping review aimed to analyze the potential and current applications of whey protein products as components of 3DP inks.

Materials and Methods: The review was conducted following PRISMA-ScR guidelines. Literature searches were performed in ScienceDirect, Scopus, and PubMed (2010–2025) using targeted keywords. VOSViewer was employed for thematic analysis of the research field.

Results: Analysis of 56 selected sources revealed that whey protein components (76% of cases involving WPI) are actively studied as ingredients for 3DP inks. Their potential applications span food production, including functional and personalized nutrition (e.g., for individuals with dysphagia), as well as biomedicine, tissue engineering, and the chemical industry. Research primarily focuses on the rheological, textural, and microstructural characteristics of 3DP materials, alongside modification methods: adjusting ink composition, pre-3DP processing (pH regulation, thermal and mechanical treatment), and post-printing techniques (drying, carbonization, microwave treatment).

Conclusion: The review confirms the promise of whey proteins in 3DP materials. To advance research, the authors recommend systematizing knowledge on key components combined with whey proteins, predictive modeling of optimal formulations based on intermolecular interactions and functional properties, and integrating other whey-derived ingredients, such as hydrolysates, into 3DP applications.

Keywords: 3D printing, whey, 3D printing inks, 3D printing ink properties

Correspondence:

Ekaterina I. Bolshakova

E-mail:

ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 09.01.2025

Accepted: 15.06.2025

Published: 30.06.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Bolshakova, E.I., Poklar Ulrich, N. (2025). Whey in 3D printing: A scoping review. *FOOD METAENGINEERING*, 3(2), 158–184. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.2.88>

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на существующие технологические решения, которые позволяют перерабатывать большие объемы вторичного продукта переработки сыра — сыворотки (использование мембранных технологий, методов консервирования, биотехнологических подходов и др.), постоянно растущее население и открытие новых предприятий оставляют проблему увеличения молочных отходов актуальной (Chourasia et al., 2022; Chaudhary et al., 2023). Согласно Sharma et al. (2018) мировое производство сыворотки превышает 160 млн тонн в год и ежегодно увеличивается на 1–2 %. Mohapatra et al. (2025) также подчеркивают проблему увеличения отходов молочной отрасли, сопутствующее ее масштабированию, и особое внимание в своей работе уделяют идее развития экономики замкнутого цикла, в рамках которой реальной становится реализация устойчивого управления побочными продуктами. В свою очередь, Hassoun et al. (2024) в контексте развития циркуляционной экономики в области пищевого производства и переработки отходов в качестве перспективных инструментов выделяют технологии Индустрии 4.0, в том числе и 3D печать (3DP). Таким образом, для предотвращения проблемы продовольственного кризиса при одновременном сохранении экологической безопасности необходимым является активное освоение современных технологий в аспекте переработки побочных продуктов молочной отрасли, в частности сыворотки.

Стратегия эффективного использования пищевых отходов является одной из ключевых задач всей перерабатывающей отрасли, в связи с чем исследователи по всему миру проводят работы по адаптации побочного сырья к 3DP (Carvajal-Mena et al., 2022; Uranga et al., 2024; Aït-Kaddour et al., 2024). Сложность использования пищевого, в том числе побочного, сырья заключается в том, что оно по своим свойствам зачастую не удовлетворяет требования к материалам для 3DP (Jeon et al., 2024). Ключевыми показателями, определяющими пригодность чернил для 3DP методом экструзии, который показал наибольшую адаптивность в пищевой промышленности согласно Carvajal-Mena et al. (2022), являются его реологические характеристики (вязкость, тиксотропность, модуль упругости, индекс консистенции и текучести и др.), а также его структурно-механические свойства (адгезия, эластичность, прочность). По данной причине ученые в данной области проводят дополнительные технологические операции (регу-

лирование pH, тепловую обработку, ультразвук и др.) для улучшения этих свойств (Daffner et al., 2021a; Maiz-Fernández et al., 2022; Gong et al., 2025), экспериментируют с компонентным составом чернил и параметрами печати (Feng et al., 2018; Thakur et al., 2023), которые также могут повлиять на конечный продукт. Повышенный интерес к технологии 3DP и ее синергии с пищевым сырьем обуславливают большое количество обзорных работ на эту тему, которые в основном структурированы по принципу: от потенциального применения к материалам для 3DP или от сырья для чернил к сферам их перспективного использования в объектах 3DP.

Ряд таких обзоров посвящен применению чернил с пищевыми компонентами в составе для 3DP с целью решения медицинских задач (Sun et al., 2022; Taneja et al., 2022; Gogoi et al., 2024; Ghobadi et al., 2025). Так, Sun et al. (2022) анализирует роль 3DP в регенерации кожных ран и спектр используемых для этого материалов (альгината, хитозана, желатина, полимолочной кислоты и др.), подчеркивая такие преимущества подхода, как персонализация под пациентов, скорость и простота изготовления, гибкость дизайна и др. Ghobadi et al. (2025) в аспекте заживления кожных ран выделяет для изучения чернила для 3D печати на основе хитозана, подчеркивая его исключительные свойства, а именно биоразлагаемость, нетоксичность и антимикробное действие. Taneja et al. (2022), Tamo et al. (2024), Gogoi et al. (2024) рассматривают гидрогели различного происхождения, в том числе натурального, в качестве перспективных чернил для 3DP в тканевой инженерии и изготовлении биокаркасов.

Группа других обзорных работ направлена на анализ текущего состояния применения 3DP в пищевой промышленности для производства продуктов питания, в том числе функциональных (Liu et al., 2017; Ma and Zhang, 2022; Y. Liu et al., 2024 и др.). Ma and Zhang (2022) изучают 3D печать как инструмент производства персонализированного питания и модификации органолептических свойств традиционных продуктов, а также предлагают алгоритм масштабирования производства персонализированных продуктов питания. Y. Liu et al. (2024) описывают основные свойства материалов, необходимые для 3DP, а также рассматривают широкий потенциал их применения в производстве детского, космического, специализированного питания, в том числе для людей с дисфагией. Последняя тема также являлась исследовательским вопросом обзорной работы Z. Liu et

al. (2024). Ранее Liu et al. (2017) систематизировали факторы, влияющие на точность и качество 3DP, которые в том числе зависят и от свойств конкретных материалов. Mu et al. (2021) акцентируют свое внимание на чернилах для 3DP на основе белков (коллагена, шелка, кератина; соевого, яичного, сывороточного белка и др.), обладающих биосовместимостью, что особенно важно в контексте применения в медицине и биоинженерии, а также высокой прочностью, особыми реологическими свойствами и способностью к управляемой молекулярной сборке, которые могут как положительно, так и отрицательно повлиять на готовый печатный продукт. Несмотря на тщательное описание ключевых технических аспектов 3DP и отдельный анализ применения кератина, фибриногена и др. белков авторы объединяют пищевые белки в одну группу, описывая их свойства в общем, однако каждый отдельный представитель этой группы обладает рядом уникальных характеристик, которые требуют индивидуального анализа в контексте их пригодности и использования для 3DP. Схожий подход к изучению данной темы в рамках рассмотрения группы объектов также был реализован Y. Wang et al. (2024) для белков, Feng et al. (2024) — для рекомбинированных пищевых гелей, Jeon et al. (2024) — для сырья животного происхождения. Подробного анализа использования сывороточных белковых компонентов (концентратов, изолятов, гидролизатов и др.) среди таких работ обнаружено не было, когда, например Rong et al. (2023), и Chen et al. (2024) осуществили это отдельно для крахмалов.

В связи с этим целью настоящего обзора предметного поля стало изучение и анализ потенциала и текущего применения белковых продуктов переработки молочной сыворотки, как компонентов в составе чернил для 3DP. Для реализации цели были поставлены следующие исследовательский вопросы:

- (1) Какие задачи, и с использованием каких методов, решают исследователи в данной области?
- (2) Какие белковые продукты переработки сыворотки используют в составе чернил для 3DP?
- (3) Как можно охарактеризовать поле применения чернил с сывороточными белковыми компонентами в составе?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Заявление о прозрачности и беспристрастности обзора

Представленный обзор предметного поля был выполнен в соответствии с руководством PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018). Авторы подтверждают, что исследование соответствовало составленному протоколу и стратегии поиска, и все отклонения от него детально описаны в методологии.

Поисковые стратегии

Базы данных

Поиск осуществляли в двух базах данных ScienceDirect, Scopus и PubMed. Базы данных ScienceDirect и Scopus удовлетворяют ряду критериев оптимальности базы данных научных источников: достоверности публикаций, гарантированной рецензируемости источников, включенных в них; эффективности поиска посредством расширенных возможностей фильтров; широкому покрытию темы за счет фокуса баз данных на специализированных журналах по инженерии, биоматериалам и пищевым технологиям. PubMed в свою очередь позволит охватить область применения сыворотки в медицинском и биомедицинском аспектах. Сортировка статей при поиске была выставлена по релевантности. Временной диапазон поиска был ограничен 2010–2025 гг. Выбор начального предела диапазона (2010 г.) обусловлен несколькими причинами. Согласно Su and Al'Aref (2018), которые в своей работе описали историю 3DP, истечение срока действия патента на технологию послойного построения объектов компании Stratasys в 2005 году привело к запуску двух проектов, реализующих разработку и распространение дизайна доступного 3D принтера, а к 2010 разрабатываемые в этот период (2005–2010 гг.) модели и технологии были упрощены, в результате чего начался активный переход от узкого применения аддитивных технологий к разработке приложений в области медицины и пищевой промышленности. Для поиска работ, соответствующих концепции исследования были использованы следующие ключевые запросы:

1 — milk “whey” for “3D printing” / milk AND whey AND “3D printing”

2 — “whey” for “3D printing” “inks” / whey AND “3D printing” AND inks

Критерии включения и исключения источников

В обзор были включены эмпирические и обзорные научные статьи, а также главы книг или монографий. По географическому признаку ограничения установлены не были, но все публикации, включенные в исследование, были опубликованы на английском языке в полнотекстовом варианте. Включенные в обзор источники соответствовали исследовательским вопросам обзора и концепции исследования, которая, как и другие критерии подробно описана в Таблице 1.

Отклонения от протокола

После скрининга источников по первому запросу в процессе скрининга было зафиксировано дублирование информации, извлеченной из исследовательских статей в обзорных статьях, в связи с этим было принято решение дополнить условия исключения источников из обзора по критерию «Тип источников». Операторами

было принято решение рассматривать только исследовательские статьи, так как обзорные работы и главы из книг/монографий чаще всего дублируют информацию из уже включенных эмпирических работ или информация по исследуемому объекту не соответствует контексту и концепции.

Извлечение данных

Для первичного структурированного аннотирования по параметрам: страна аффилиации авторов, ссылка, год публикации, название работы, гипотеза исследования, основные задачи исследования, ключевые выводы и результаты исследования использовали искусственный интеллект (ИИ) ChatGPT-4o.

По результатам поиска было обнаружено 895 источников. В процессе идентификации первых 200 работ по запросу №1 в базе данных ScienceDirect было зафиксировано постепенное снижение их релевантности

Таблица 1

Критерии включения и исключения источников в обзор

Table 1

Inclusion and Exclusion Criteria for Sources in the Review

Критерий	Включение	Исключение	Обоснование
Контекст	Были включены исследования, описывающие использование сыворотки в ЗДП, включая не только сыворотку как таковую, но и ее белковые компоненты, их обработку, преимущества и ограничения	Были исключены источники, не относящиеся к применению молочной сыворотки или ее белковых продуктов переработки в ЗДП, а также источники, где сыворотка упоминается без связи с материалами для 3D-печати	Обеспечивает фокус на специфических аспектах применения молочной сыворотки в ЗДП, исключая работы общего характера, которые не имеют практической ценности для анализа
Концепция	В обзор были включены работы, которые рассматривают сывороточные белковые компоненты как элементы состава чернил и оценивают их функциональность, свойства или ограничения в рамках применения	Исключены работы, которые не описывают молочную сыворотку или её продукты переработки как компоненты чернил для ЗДП	Обеспечивает анализ только релевантных данных по ключевому объекту исследования — молочной сыворотке, как сырью для ЗДП
Язык	Английский	Все языки кроме английского	Английский язык является основным языком научных публикаций и открывает доступ к наиболее актуальным исследованиям и международным данным
Типы источников	Обзорные и эмпирические статьи, главы книг и монографий	Исключены тезисы конференций, неопубликованные рукописи, научно-популярные статьи, патенты и материалы без рецензирования.	Исключение нерецензируемых источников позволяет избежать недостоверной информации
Статус публикаций	Опубликованные полнотекстовые варианты, доступные в сети Интернет	Все источники, полный текст которых не опубликован	Исключение недоступных полнотекстовых вариантов предотвращает искажение выводов из-за недостатка информации

относительно ключевого запроса, в связи с чем операторами было принято решение остановить анализ данного запроса и перейти к следующему. Таким образом, в процессе скрининга 604 источника по обоим запросам было исключено 552 источника, из которых 35 не имели полнотекстового варианта в открытом доступе, 32 оказались дубликатами, 207 не удовлетворяли условиям включения критериев «Концепция» и «Контекст», 1 источник не соответствовал критерию «Язык», 277 не соответствовали дополнительным введенным условиям по критерию «Тип источника» в результате отклонения от протокола. В процессе скрининга работ поиск по тексту ключевого слова «whey» позволил выявить 4 источника, соответствующих критериям отбора

в ссылках при сравнении данных в работах, которые сами этим критериям не отвечали. Эти 4 работы были дополнительно включены в обзор, тем самым общее число работ на этапе анализа полнотекстовых вариантов составило 56. Диаграмма отбора источников для обзора предметного поля по PRISMA-ScR представлена на Рисунке 1.

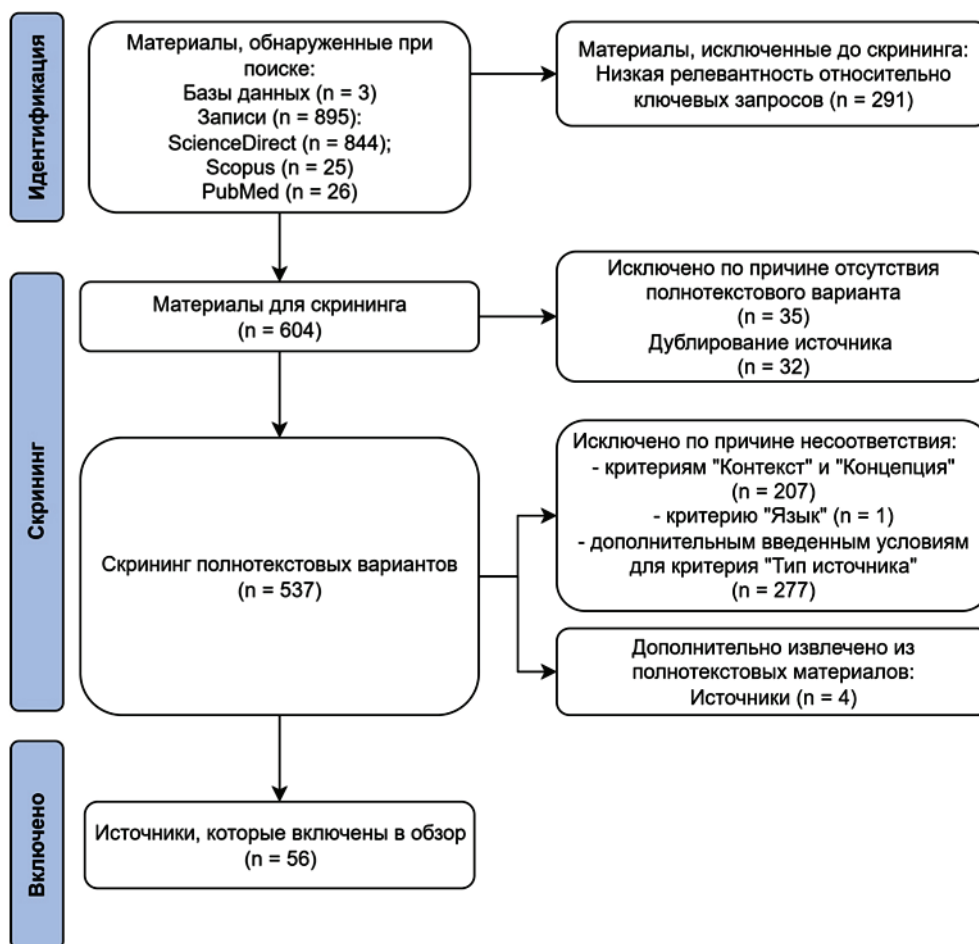
При анализе исключённых источников по критериям «Концепция» и «Контекст» было выявлено, что ряд работ лишь упоминали 3DP как потенциальную область применения для гелей или других материалов. Однако в исследованиях не содержалось практических примеров, описания технологий или анализа опыта прямого использования 3DP, что делало их нерелевантными

Рисунок 1

Диаграмма процесса отбора источников для обзора предметного поля по PRISMA-ScR

Figure 1

PRISMA-ScR Flow Diagram of the Source Selection Process for the Scoping Review



цели обзора. В некоторых статьях молочная сыворотка упоминалась лишь как пример для сравнения с другими материалами, но не являлась основным или одним из основных объектов исследования, что снижало их ценность для анализа специфических свойств сыворотки в контексте 3DP. Несмотря на значительное количество публикаций, описывающих использование других объектов в составе материалов для 3DP, дополнительные операции по внесению уточнений в ключевые запросы не проводились. Это связано с тем, что по первичному анализу было установлено: продукты переработки молочной сыворотки часто используются в комбинации с другими пищевыми материалами.

Визуализация

Все отобранные источники были экспортированы в формате ris и проанализированы с использованием программного обеспечения "VOSViewer," что позволило на основе библиографических данных визуализировать частоту и взаимосвязи ключевых слов, предоставляя наглядное представление структуры исследуемого

предметного поля. Порог минимального количества упоминаний ключевого слова был установлен на 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание отобранных источников

По результатам анализа 157 ключевых слов два или более двух раз встречалось 16 слов или словосочетаний. Их частота встречаемости представлена на Рисунке 2.

Согласно результатам анализа на рисунке 2 можно сделать вывод о том, что отобранные статьи для данного обзора по ключевым словам соответствуют его исследовательским вопросам. Основное внимание уделено изучению реологических свойств, текстуры, микроструктуры и применению сывороточных компонентов, таких как изолят сывороточных белков, в 3DP. Наиболее часто используемые материалы для 3DP представлены в виде эмульсионных гелей, эмульсий и эмульсий с высокой степенью насыщения внутренней фазы. Результаты анализа по хронологическому распределению источников представлены на Рисунке 3.

Рисунок 2

Частота встречаемости ключевых слов

Figure 2

Keyword Frequency Distribution

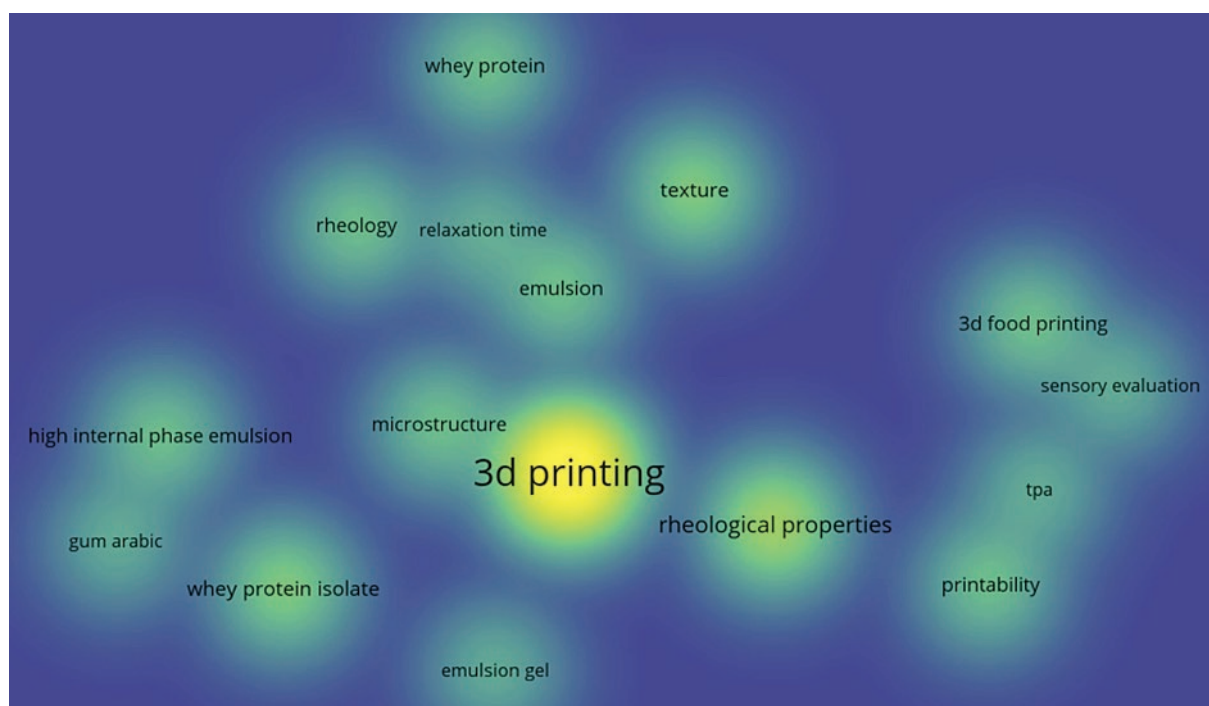
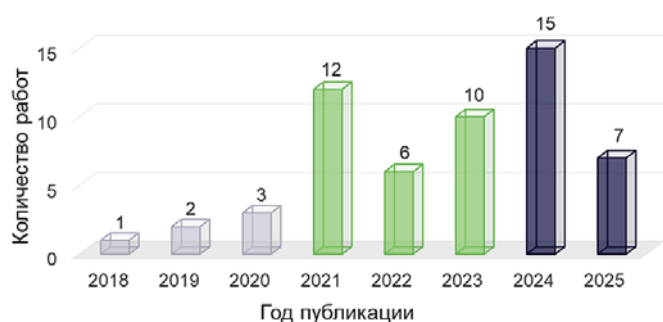


Рисунок 3

Хронологическое распределение отобранных источников

Figure 3

Chronological Distribution of Included Sources



Несмотря на то, что временной диапазон в данном обзоре составил 15 лет (с 2010 по 2025 год), источники, соответствующие критериям включения были обнаружены только в публикационный период с 2018

по 2025 гг. Отсутствие релевантных публикаций до 2018 года вероятно связано с тем, что в более ранний период фокус исследований по теме ЗДР был направлен на фундаментальные аспекты и не достаточно широко охватывал вопрос потенциала и перспективности использования вторичных сырьевых ресурсов, в том числе сывороточных белковых компонентов для производства чернил, используемых при создании 3D печатных объектов. Наибольшее количество работ, соответствующих исследовательским вопросам работы обнаружены в период с 2021 по 2024 гг., может быть обусловлен значительным развитием технологий аддитивного производства и увеличением их доступности в последние годы. Согласно данным UnivDatos¹, рынок 3D-печати оценивался примерно в 15,5 млрд долларов США в 2023 году и, как ожидается, будет расти с устойчивым среднегодовым темпом роста около 19,5% в течение прогнозируемого периода.

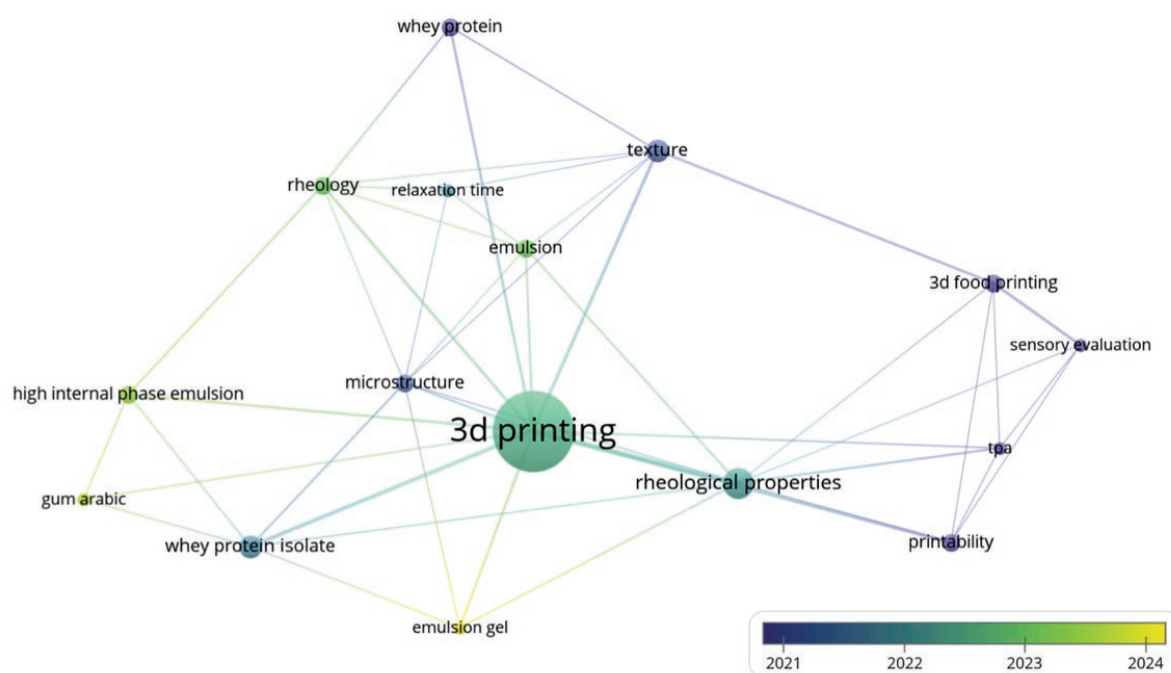
Карта взаимосвязи ключевых слов с учетом хронологии публикаций представлена на Рисунке 4.

Рисунок 4

Карта взаимосвязи ключевых слов с учетом хронологии публикаций

Figure 4

Keyword Co-occurrence Map with Chronological Overlay



¹ UnivDatos. (2023) 3D Printing Market: Current Analysis and Forecast (2024–2032) <https://univdatos.com/report/3d-printing-market/>

Состав и тип систем чернил для 3DP

Анализ отобранных источников позволил определить, что основной задачей в контексте использования продуктов переработки сыворотки в 3DP является разработка материалов с оптимальными печатными свойствами, и как следствие получение устойчивых и перспективных в применении напечатанных объектов. Несмотря на общую задачу в ряде исследований она достигается подбором компонентного состава рецептур, в том числе и концентраций (Shi et al., 2025; Liu et al., 2018), в других работах — воздействием различных технологических операций (регулирования pH, тепловой или механической обработки) на материал перед печатью (Daffner et al., 2021; Uribe-Alvarez et al., 2023) или пост-обработкой напечатанных объектов

(Llamas-Unzueta et al., 2022; Kamlow et al., 2021). Также эти подходы могут быть комбинированы. Однако, при разработке материала для 3DP ключевой задачей является выбор и обоснование компонентов рецептуры, поскольку от их физико-химических свойств зависит способность материала к межмолекулярным взаимодействиям, что напрямую влияет на структурные характеристики готовых изделий (Daffner et al., 2021a). В связи с этим первый этап анализа отобранных работ был направлен на обзор компонентного состава рецептур и типа разработанных систем (Таблица 2). Тип системы был определен на основании используемых терминов относительно материала для 3DP в работах исследователей.

Таблица 2

Компонентный состав и тип системы материалов для 3DP

Table 2

Component Composition and System Type of Materials Used for 3D Printing

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
Изолят сывороточного белка	Концентрат мицеллярного казеина, молочный жир	Суспензия	Daffner et al. (2021a)
	Льняное масло, каппа-каррагинан (0–0,8 %)	Эмульсия, эмульсионный гель	Shi et al. (2025)
	α-Лактоза моногидрат, деионизированная вода	НУ*	Fanghui Fan et al. (2022)
	Концентрат мицеллярного казеина, деминерализованная вода	Суспензия	Daffner et al. (2021b)
	Концентрат молочного белка, глицерин, ксантановая камедь	Паста	Liu et al. (2018)
	Греческий йогурт, желатин, подсластитель	Гель	Riantiningtyas et al. (2021)
	Мягкий сыр, полученный термокислотным способом, мальтитол,	Композитный полутвердый материал	Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Bareen et al. (2023b)
	Каноловое масло, кукурузный крахмал, дистиллированная вода	Паста	Liu et al. (2021)
	Хлорид кальция, вода	Гель	Uribe-Alvarez et al. (2023)
	Подсолнечное масло, каппа-каррагинан	Эмульсионный гель	Kamlow et al. (2021)
	Гидроксипропилированный крахмал, каррагинан, кукурузное масло, сухое цельное молоко, целлюлоза, альгинат натрия	Эмульсия	Cai et al. (2022)
	Поливиниловый спирт, раствор глутарового альдегида, фосфатный буфер, сульфат гентамицина, гидроксиапатит	Композит	Tut et al. (2022)
	Молоко, соевое масло, неэмульгированный жидкий и кристаллический порошковый витамин Д3, казеинат натрия, азид натрия	Наноэмульсионный гель	Joshi et al. (2024)
	Картофельный крахмал, кукурузное масло, куркумин, ксантановая камедь	Эмульсионный гель	Cheng et al. (2024)

Продолжение Таблицы 2

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
	Желатин, взбитые сливки, пастеризованные яйца, сахар, лимонная кислота	Гель	Chow et al., (2021)
	Рисовый крахмал, соевое масло, ресвератрол, β-Каротин	Высокофазная эмульсия, гель	Zheng et al. (2024)
	Геллановая камедь	Гель	Oliveira et al. (2020)
	Пробиотик, эпигаллокатехин галлат, гидроксипропилированный крахмал, ресвератрол, цельное сухое молоко, целлюлоза, альгинат натрия, каррагинан, желатин, казеинат натрия и др.	Эмульсионный гель	Cai et al. (2023)
	Каппа-каррагинан, подсолнечное масло, коричный альдегид, хлорид калия, вода	Эмульсионный гель	Kamlow et al. (2022)
	Гуммиарабик, оливковое масло	Высокофазные** эмульсии, гель	Kan et al. (2023)
	Соевое масло	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга, гель	Liu et al. (2019)
	Соевое масло, трансглутаминаза, хлорид натрия	Эмульсионный гель	Li et al. (2024)
	Концентрат пищевых волокон спаржи, масло	Эмульсионный гель	Lu et al. (2024)
	Соевое масло, фукоксантин, глицерил моностеарат	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга, гель	Shang et al. (2023)
	Картофельный крахмал, ксантановая камедь, куркумин	Гель	Shen et al. (2023)
	Кукурузный крахмал	Гель	Xian et al. (2024)
	Гуммиарабик, натриевая соль альгиновой кислоты	Гидрогель	Kan et al. (2024)
	Сублимированные грибы Flammulina velutipes, оливковое масло, ксантановая камедь и др.	Эмульсионный гель	Dong et al. (2024)
	Порошок сублимированной красной капусты, сухой яблочный порошок, альгинат натрия, гуммиарабик	Гель	Ghazal et al. (2023)
	Мицеллярный казеин, соевый белковый изолят, гороховый белковый изолят, диоксид титана, графит, хитозан, казеинат натрия, подсолнечное масло и др.	Эмульсионный гель	W. Li et al. (2021)
	Мицеллярный казеин, микропартикулят сывороточного белка, взбитые сливки, хлорид натрия, вода	Эмульсионный гель	Sager et al. (2020)
	Гуаровая камедь, ксантановая камедь, гуммиарабик, короткоцепочечные триглицериды	Эмульсионный гель	Feng et al. (2025)
	Рибофлавин, ксантановая камедь	Паста	Araújo et al. (2025)
	Каппа-каррагинан, конжаковая камедь	Гель	Kong et al. (2025)
	В-каротин, гуаровая камедь, ксантановая камедь, гуммиарабик, камедь рожкового дерева	Эмульсионный гель	Li et al. (2023)
	Желатин, альгинат	Гидрогель	Sümbelli et al. (2021)
	Корневище лотоса	Композитный гель	Wang et al. (2025)
	Соевое масло, проантоцианидины, куркумин	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга	Ji et al. (2025)
	Масло антарктического криля, карбоксиметилхитозан	Эмульсионный олеогель	Zhao et al. (2025)
	Метакриловый ангидрид	Гидрогель	Hu et al. (2022)
	Полисахаридный комплекс персиковой камеди, олигонуклеотиды с гидрофобными концевыми модификациями	Эмульсионный гель	R. Zhang et al. (2024)
Изолят сывороточного белка фибриллярной формы	Фруктоолигосахариды, геллановая камедь, глицерилтрибутерат, пробиотик	Композитный гидрогель	Zhang et al. (2024)
	Соевое масло, крахмалы, куркумин	Композитный эмульсионный гель	Z. Wang et al. (2024)
	Зеин, кукурузное масло, ликопин	Высокофазные** эмульсии Пеккеринга	Xia et al. (2024)

Окончание Таблицы 2

Сывороточный компонент	Другие основные компоненты состава	Тип системы	Ссылка
Концентрат сывороточного белка	Конжаковая мука, кюрдлан, бикарбонат натрия	Гель	Du et al. (2021)
	Подсолнечное масло, пчелиный воск, картофельный крахмал	Олеогель	Shi et al. (2021)
	Тыквенная мука, сухой шпинат, сорговая мука, сухой фиолетовый картофель, ксантановая камедь	Паста	Zheng et al. (2021)
	Казеинат кальция, высокофруктозный кукурузный сироп, масло (среднецепочечные триглицериды), глицерин, шоколад	Паста	Zhu et al. (2021)
	Биоразлагаемая полимолочная кислота (PLA)	Раствор	Kayadurmus et al. (2024)
Сухая сыворотка	Вода	Паста	Llamas-Unzueta et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2024)
Бета-лактоглобулин	Желатин, альгинат натрия, гидрохлорид допамина и др.	Гель	Ghorbani et al. (2024)
Лактоферрин	Пектин, каппа-каррагинан, куркумин, подсолнечное масло, β-каротин, масло (среднецепочечные триглицериды), овсяный β-глюкан, хитозан, эпигаллокатехин галлат	Высокофазные** эмульсии, гидрогели	Xu et al. (2023)
	Поликапролактон, изолят сывороточного белка (WPI)	Порошковая смесь	Hewitt et al. (2019)

Примечание. *НУ — не уточнено в источнике. **Эмульсия с высокой степенью насыщения внутренней фазы
Note. * Not specified — no information provided in the source. ** High internal phase emulsion — emulsion system with a high volume fraction of internal phase

Тип систем для экструзионной 3DP ограничен тем, что для прохождения чернил через сопло они должны обладать особыми реологическими свойствами, обеспечивающими баланс между текучестью и способностью сохранять форму после экструзии (Hussain et al., 2021). Это означает, что материал должен демонстрировать сдвиговое разжижение (становиться менее вязким при приложении напряжения) и достаточную структурную стабильность после нанесения слоя. При обзоре литературы были выявлены различные типы систем, используемых для 3DP, включая суспензии, эмульсионные гели, гидрогели, пасты и композитные системы. На этапе разработки чернил используемый материал мог находиться в виде эмульсии или суспензии (Daffner et al., 2021a; Shi et al., 2025 и др.), после чего технологическая обработка (регулирование pH и тепловая обработка) способствовала переходу в более структурированное состояние (в основном в гель), обеспечивая необходимую вязкость и механическую прочность для печати.

Вне зависимости от типа систем выявлено, что в 76 % изученных работ исследователи в качестве сывороточного компонента использовали изолят сывороточных белков (WPI), еще в 5 % также был использован WPI, однако он находился в фибриллярной форме, в 9 % применяли концентраты сывороточных белков, в 4 % — сухую сыворотку и лишь в 2 % и 4 % — отдельные сывороточные белки (бета-лактоглобулин и лактоферрин, соответственно). Превалирование WPI в ре-

цептурах может быть обусловлено рядом преимуществ этой формы сывороточных белков, которые отмечают авторы, а именно: высокая пищевая ценность, эмульгирующая способность, легкая усвояемость и биодоступность, биосовместимость, а также потенциал к образованию гелей (Sager et al., 2020; Tut et al., 2022; Cai et al., 2023; Riantiningtyas et al., 2024; Shi et al., 2025). В работах Daffner et al. (2021b), Bareen et al. (2021) при добавлении WPI в рецептуру с казеин-содержащим компонентом (концентрата молочного белка, обезжиренное молоко) отмечена стабилизация гелей за счет образования дисульфидных связей, что впоследствии улучшало механическую прочность напечатанных объектов. Аналогичный эффект обнаружен в работе Dong et al. (2024), где авторы сравнивали WPI с концентратами растительных белков, для которых образование дисульфидных связей недоступно. В свою очередь, в исследованиях Riantiningtyas et al. (2024), Liu et al. (2018) WPI использовали для уменьшения вязкости и ослабления текстуры геля, что на первый взгляд может казаться недостатком, но на самом деле облегчает экструзию геля через узкое сопло 3D принтера. Эти примеры указывают на уникальность WPI, так как в зависимости от состава рецептуры он может играть различную роль. Так, функцию эмульгатора WPI выполнял в работах Liu et al. (2021), Kamlow et al. (2021), Kamlow et al. (2022), Cai et al. (2022), Joshi et al. (2024), Zheng et al., (2024), Lu et al. (2024); функцию стабилизатора в исследованиях Oliveira et al. (2020), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023) и др.

Однако помимо положительных эффектов применения WPI рядом ученых были отмечены и негативные проявления внесения компонента в рецептуру или увеличения его концентрации в ней, а именно недостаточная стабильность (Sager et al., 2020), риск потери упругости (Liu et al., 2018), ухудшение текстурных свойств (Liu et al., 2021), неспособность заполнять междисперсные пустоты (Li et al., 2021), низкая влагоудерживающая способность (Dong et al., 2024), низкая способность к поддержанию формы сложной архитектуры (Xian et al., 2024).

Учитывая ограничения WPI ученые используют различные способы для регулирования его свойств и получения конкурентноспособных чернил для 3DP. Структурой и устойчивостью гелей с WPI можно управлять внесением дополнительных добавок, например полисахаридов (ксантановой, гуаровой, геланновой камеди, гуммиарабика, каррагинана и др.), которые активно используются в работах данного поля (Liu et al. 2018; Kamlow et al., 2022; Shen et al., 2023; Cheng et al., 2024 и др.). Реакция Майяра между сывороточными белками и полисахаридами является одним из механизмов стабилизации геля согласно Kan et al. (2023). В свою очередь, в исследовании Li et al. (2024) было продемонстрировано, что добавление трансглутаминазы в состав геля на основе WPI и соевого масла значительно улучшило экструдированность материала через сопло 3D-принтера. Это было достигнуто за счет повышения упорядоченности структуры геля и оптимизации распределения воды в гелевой сети. Согласно авторам трансглутаминаза может значительно повысить точность 3DP.

Другими рецептурными решениями для улучшения свойств гелей являлись внесение молочной жировой фракции в работы Sager et al. (2020), и Daffner et al. (2021a), получение фибриллярной формы WPI и использование ее в составе у Xia et al. (2024), и Z. Wang et al. (2024). Sager et al. (2020) в свою очередь также дополнительно к WPI использовали микропартикулят сывороточных белков, который не участвовал в образовании связей и вел себя как инертный наполнитель в гелевой сети.

Помимо подбора различных рецептов для управления свойствами 3DP чернил существуют и другие технологические подходы. Так, Hewitt et al. (2019) использовал другую технологию печати MEW, которая позволяет создавать 3D структуры путем нанесения расплавленных полимерных волокон на субстрат с помощью электрического поля. Данная техника позволила получить

высокопористый 3DP материал с четкой формой пор и улучшенной биоактивностью (Hewitt et al., 2019).

Другие технологические операции, а именно регулирование pH, тепловая или ультразвуковая обработка, гомогенизация высокого давления также были применены для изменения свойств 3DP материалов и 3DP объектов (Daffner et al., 2021a, 2021b; Du et al., 2021; W. Li et al., 2021; Z. Wang et al., 2024; Shi et al., 2025). В работе Sümbelli et al. (2020) для разработки гидрогелей на основе белка исследователи использовали фотохимический метод сшивания белков *in situ* ANADOLUCA. Так как данный метод реализуется в мягких условиях без агрессивных химических реагентов, он позволил исследователям получить нетоксичные гели на основе WPI с улучшенной стабильностью и выживаемостью клеток (Sümbelli et al., 2020).

Ключевой задачей тепловой обработки и регулирования pH являлось управление состоянием белка, а именно инициация его денатурации, взаимодействия с другими компонентами и образование комплексов. Механическая обработка в основном была направлена на получение однородной смеси и предотвращения осаждения компонентов или на уменьшение размера жировых частиц, увеличение их площади поверхности и формирования эмульсий — при содержании жировой составляющей. В качестве пост-обработки исследователи применяли карбонизацию (Llamas-Unzueta et al., 2022; Llamas-Unzueta et al., 2024) и сушку различными способами: микроволнами, инфракрасным излучением и горячим воздухом (Shen et al., 2023) для стабилизации напечатанных объектов, а также СВЧ обработку для модификации органолептических свойств (Ghazal et al., 2023). Несмотря на то, что исследователи использовали разные подходы к улучшению свойств 3DP-материалов, в большинстве работ анализу подвергался схожий набор ключевых характеристик с использованием общих методологических подходов.

Свойства материалов для 3DP и методы их анализа

Каждый из исследуемых в работах показателей отвечает конкретной задаче в аспекте определения пригодности материала для 3DP и может быть изучен несколькими методами (Таблица 3).

Таблица 3

Исследуемые свойства и используемые методы для анализа 3DP чернил и объектов

Table 3

Analyzed Properties and Methods Used for Characterization of 3DP Inks and Printed Constructs

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
<i>Реология</i>		
Модуль накопления (G'), модуль потерь (G''), предел текучести и/или др. реологические тесты	Реометрия, Kinexus Pro, DHR, HAAKE, Discovery HR-3, MCR и др.	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Du et al. (2021), Z. Wang et al. (2024), Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), Riantiningtyas et al. (2021), Shi et al. (2021), Xia et al. (2024), Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Bareen et al. (2023b), Liu et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Kamlow et al. (2021), Joshi et al. (2024), Llamas-Unzueta et al. (2022), Cheng et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Zheng et al. (2021), Liu et al. (2019), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Lu et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Xian et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Li et al. (2021), Sager et al. (2020), Araújo et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Sümbelli et al. (2021), Wang et al. (2025), Ji et al. (2025), Zhao et al. (2025), Hu et al. (2022), R. Zhang et al. (2024)
Температура перехода из раствора в гель ($T_{sol-gel}$)*	Реометрия, Kinexus Pro	Daffner et al. (2021a); Daffner et al. (2021b)
Вязкость	Реометрия, Kinexus Pro, DHR, HAAKE, Discovery HR-3, MCR и др.	Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), (Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Liu et al. (2021), Bareen et al. (2023b), Llamas-Unzueta et al. (2022), Chow et al., (2021), Oliveira et al. (2020), Liu et al. (2019), Kan et al. (2023), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), R. Zhang et al. (2024)
Тиксотропия	Реометрия, DHR, HAAKE, MCR	Shi et al. (2025), Zheng et al. (2024), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023), Xian et al. (2024)
Псевдопластичность	Реометрия, MCR	Joshi et al. (2024)
Поведение при ползучести и степень восстановления	Реометрия, DHR, MCR	Riantiningtyas et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Zheng et al. (2024), Sager et al. (2020)
Индекс восстановления	Реометрия, MCR	Bareen et al. (2021)
Время релаксации	Реометрия, HAAKE	Fan et al. (2022)
	Низкопольный ядерный магнитный резонанс MesoMR23–060H	Zhang et al. (2024), Shang et al. (2023)
Экструзируемость	Измерение механической силы, универсальная испытательная машина Zwick Roell Z010 с 50-Н нагрузочной ячейкой	Uribe-Alvarez et al. (2023)
<i>Текстурный профиль</i>		
Текстурные свойства (прочность геля, твердость, хрусткость, адгезивность, упругость и пр.)	Текстурный анализ, TA-XT, TA-XTC, Texture Pro и др.	Shi et al. (2025), Fan et al. (2022), Liu et al. (2018), Z. Wang et al. (2024), Riantiningtyas et al. (2021), Shi et al. (2021), Bareen et al. (2021), Bareen et al. (2023a), Liu et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Kamlow et al. (2021), Cheng et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2021), Zhu et al. (2021), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Xian et al. (2024), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), Sager et al. (2020), Feng et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025), Zhao et al. (2025)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
<i>Характеристика частиц и их взаимодействий</i>		
Дзета (ζ)-потенциал и/или размер частиц (в т.ч. капель), индекс полидисперсности	Метод лазерного динамического светорассеяния Malvern Mastersizer, Zetasizer SYNC	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Zheng et al. (2024), Shi et al. (2025), Cai et al. (2023), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), W. Li et al. (2021), Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Ji et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
	Спектроскопия ядерного магнитного резонанса	Kamlow et al. (2022)
	Анализ изображения капель, полученных при помощи световой микроскопии, с использованием ПО Nano Measurer	Zhao et al. (2025)
Анализ взаимодействий между компонентами	ИК-Фурье спектроскопия, Nicolet iS50, Jasco, FT-IR и др.	Shi et al. (2025), Tut et al. (2022), Cheng et al. (2024), Ghorbani et al. (2024), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Feng et al. (2025), Kayadurmus et al. (2024), Wang et al. (2025), Hu et al. (2022), R. Zhang et al. (2024)
	Спектроскопия кругового дихроизма	Shang et al. (2023), Hu et al. (2022)
	Спектроскопия ядерного магнитного резонанса	Hu et al. (2022)
	Спектрофотометрический анализ гидрофобности поверхности с помощью связывания бромфенолового синего при 25°C, длина волны 596 нм	Wang et al. (2025)
	Анализ межмолекулярных сил: растворимость белка в селективных денатурах (NaCl, мочевины, β -меркаптоэтанол) для определения вклада ионных, водородных, гидрофобных и дисульфидных взаимодействий	Wang et al. (2025)
Межфазные свойства (межфазное натяжение масло-вода, поверхностное натяжение газ-жидкость и т. д.)	Оптический измеритель угла контакта и устройство для осциллирующей капли	Shi et al. (2025), Zheng et al. (2024), Shang et al. (2023)
	Измерение трехфазного угла смачивания с помощью анализатора формы капли DSA-30 и измерение поверхностного натяжения газа и жидкости\межфазного натяжения масла и воды с использованием пластины Вильгельми	Ji et al. (2025)
	ВСА-тест для определения скорости адсорбции белка и поверхностной плотности на границе раздела масло-вода	Ji et al. (2025)
Микроструктура	Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, Leica, Olympus, Zeiss и др.	Daffner et al. (2021a), Shi et al. (2025), Liu et al. (2018), Xia et al. (2024), Bareen et al. (2023a), Kamlow et al. (2021), Chow et al. (2021), Zheng et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Lu et al. (2024), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Feng et al. (2025), Ji et al. (2025)
	Криогенная трансмиссионная микроскопия, Tecnai G2 F30 (200 кВ) с CETA CMOS детектором	Daffner et al. (2021a)
	Трансмиссионная электронная микроскопия	Zhang et al. (2024), Kan et al. (2024)
	Крио-сканирующая электронная микроскопия, Hitachi, Magellan и др.	Shi et al. (2025), Cheng et al. (2024), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024), Lu et al. (2024)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
	Сканирующая электронная микроскопия (в т.ч. полевая эмиссионная), Phenom Pro, Zeiss и др.	Z. Wang et al. (2024), Bareen et al. (2021), Tut et al. (2022), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Llamas-Unzueta et al. (2022), Ghorbani et al. (2024), Liu et al. (2018), Liu et al. (2019), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Dong et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021), Wang et al. (2025), Ji et al. (2025), Hu et al. (2022)
	Флуоресцентная микроскопия, Axio Vert A1 и др.	Du et al. (2021), Shi et al. (2021), Shang et al. (2023), Ghazal et al. (2023), Hewitt et al. (2019), Ji et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
	Оптическая микроскопия Leica, Olympus и др.	Xia et al. (2024), Kan et al. (2023), Xian et al. (2024), Kan et al. (2024), W. Li et al. (2021), Ji et al. (2025)
	Световая микроскопия	Zhao et al. (2025)
	Рентгеновская дифракция	Tut et al. (2022), Joshi et al. (2024), Dong et al. (2024)
	Микроскопия в поляризованном свете	Cai et al. (2023)
	Лазерная конфокальная Рамановская спектроскопия	Wang et al. (2025)
Белковый состав	Электрофорез в полиакриламидном геле с додецилсульфатом (SDS-PAGE)	Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b), Kan et al. (2024)
Влагоудерживающая способность	Центрифугирование и расчет по формуле	Shi et al. (2025), Z. Wang et al. (2024), Dong et al. (2024), Kong et al. (2025), Li et al. (2023)
Маслоудерживающая способность	Центрифугирование и расчет по формуле	Zheng et al. (2024), Zhao et al. (2025)
Распределение влаги	Магнитно-резонансная томография, MesoMR23–060H-I	Shi et al. (2025)
	Низкопольный ядерный магнитный резонанс, MicroMR20–030V-I, PQ001 и др.	Du et al. (2021), Liu et al. (2018), Zheng et al. (2021), Li et al. (2024), Shen et al. (2023), Dong et al. (2024), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025)
Теплофизические свойства (температура стеклования, температура плавления, температура кристаллизации, температура гелеобразования)	Дифференциальная сканирующая калориметрия	Fan et al. (2022), Shi et al. (2021), Kamlow et al. (2021), Tut et al. (2022), Zheng et al. (2024), Li et al. (2024)
	Термогравиметрический анализ от 20 до 600 °C со скоростью 10 °C/мин в атмосфере азота с регистрацией кривых	Wang et al. (2025)
Пористость, и/или размер пор, и/или размер ребер жесткости	Адсорбция/десорбция азота при низких температурах, BELSORP-MR6	Fan et al. (2022)
	Анализ SEM-изображений с использованием или без использования ImageJ (плагин ND) и DiameterJ	Hewitt et al. (2019). Kayadurmus et al. (2024)
	Вторичное проникновение ртути, порозиметр	Llamas-Unzueta et al. (2022)
<i>Стабильность ЗДР материалов и ЗДР объектов</i>		
Стабильность при хранении	Хранение при 4 °C в течение 90 дней; визуальная оценка	Shi et al. (2025)
	Хранение при 4 °C в течение 30 дней; визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Хранение при 25°C 14 дней	Shang et al. (2023)
	Хранение при 25°C 1 год	Xu et al. (2023)
	Хранение при температуре 4 °C в течение 7 дней, фотографирование	Ji et al. (2025)
	Тест на набухание и/или деградацию	Tut et al. (2022), Ghorbani et al. (2024),Feng et al. (2025), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021)
	Анализ биоразложения с помощью набора для анализа белков Qubit®; высвобождение белка отслеживалось в течение 21 дня и выражалось в процентах от добавленного белка	Hewitt et al. (2019)

Продолжение Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
Свойства жидкости в материалах	Тест на синерезис, измерения и вычисления	Kamlow et al. (2022)
	Тест на потерю воды, измерения и вычисления	Xian et al. (2024)
Оценка устойчивости	Оценка влияния концентрации соли на стабильность гелей и их микроструктуру	Shang et al. (2023)
Устойчивость к окислению	Определение перекисного числа (POV) для продуктов первичного окисления липидов и анализ TBARS для определения продуктов вторичного окисления липидов (эквиваленты малонового диальдегида)	Ji et al. (2025), Zhao et al. (2025)
Термоустойчивость/Свойства пастеризации	Нагревание при 90°C в водяной бане 30 минут, визуальная оценка, температурное сканирование; HAAKE MARS60, Thermo Fisher	Shi et al. (2025)
	Нагревание при 75°C в течение 30 минут и охлаждение до 25°C в ледяной бане, визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Нагревание от комнатной температуры до 800 °C со скоростью 20 °C/мин в азотной атмосфере с использованием TGA550 (TA Instruments, США)	Feng et al. (2025)
	Нагревание от 50 °C до 95 °C со скоростью 12 °C/мин, выдержка 2,5 мин, затем охлаждение до 50 °C с той же скоростью с использованием анализатора RVA-Super; регистрация параметров вязкости	Wang et al. (2025)
Стабильность при замораживании и оттаивании, характер оттаивания	Замораживание при –20 °C на 24 ч, оттаивание при 25 °C в течение 2 ч; визуальная оценка,	Shi et al. (2025)
	Замораживание при –20 °C на 18 ч, оттаивание при 20 °C в течение 6 ч; визуальная оценка	Xia et al. (2024)
	Замораживание при –20 °C на 4 ч, оттаивание при 25 °C в течение 6 ч; оценка микроструктуры и времени релаксации	Shang et al. (2023)
	Дифференциальная сканирующая калориметрия, Pyris Diamond	Liu et al. (2019)
Стабильность при центрифугировании	Визуальная и расчетная оценка после центрифугирования	Xia et al. (2024), Lu et al. (2024), Ji et al. (2025)
Жесткость (модуль накопления E')	Динамическо-механический анализатор, Mettler-Toledo	Fan et al. (2022)
Устойчивость к механической нагрузке (модуль потерь E'')	Динамическо-механический анализатор, Mettler-Toledo	Fan et al. (2022)
Точность печати и/или геометрические физические характеристики	Визуальная оценка, фотографирование и анализ, и/или численные измерения	Z. Wang et al. (2024), Uribe-Alvarez et al. (2023), Riantiningtyas et al. (2021), Bareen et al. (2023b), Joshi et al. (2024), Chow et al., (2021), Zheng et al. (2021), Lu et al. (2024), Araújo et al. (2025), Kong et al. (2025), Li et al. (2023), Wang et al. (2025)
Индекс стабильности Turbiscan (TSI)	Анализ с использованием Turbiscan и расчеты	Feng et al. (2025), Zhao et al. (2025), R. Zhang et al. (2024)
<i>Другие специфические методы</i>		
Механические свойства (прочность, сжимаемость)	Испытание на сжатие, SHIMADZU EZ-LX, Instron Model 8562 и др.	Tut et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2022), Kayadurmus et al. (2024), Sümbelli et al. (2021), Hu et al. (2022)
	Измерение крутящего момента до разрушения	Llamas-Unzueta et al. (2024)

Окончание Таблицы 3

Исследуемые параметры и свойства	Метод, оборудование	Ссылка
Эффективность инкапсуляции и стабильности веществ	Српектрофотометрия и расчеты, Lambda 35 UV-VIS, TU-1810PC и др.	Tut et al. (2022), Joshi et al. (2024), Cheng et al. (2024), Zheng et al. (2024), Shang et al. (2023), Shen et al. (2023), Araújo et al. (2025), Kayadurmus et al. (2024), Li et al. (2023), Ji et al. (2025), Ji et al. (2025)
	Посевной метод для пробиотиков, ВЭЖХ для эпигаллокатехин галлата	Cai et al. (2023)
Эффективность высвобождения лекарственного средства	Српектрофотометрия, Lambda 35 UV-VIS	Tut et al. (2022)
Выживаемость клеток	Посевной и пластинчатый метод с серийными разведениями	Cai et al. (2023)
Высвобождение биоактивных веществ	Система имитации пищеварения с автоматическим титратором, инкубатором и пр.	Cai et al. (2023), Shang et al. (2023), Feng et al. (2025)
	In vitro переваривание, центрифугирование и флуоресцентная спектроскопия для определения биодоступности Rb (%)	Araújo et al. (2025)
	Центрифугирование кишечного содержимого для выделения мицеллярной фазы, экстракция метанолом/MTБЭ и количественное определение АСТ для расчета биодоступности (%).	Zhao et al. (2025)
Переваримость	In vitro переваривание с расчетом степени гидролиза или без него	Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Zhao et al. (2025)
Взаимодействие с живыми клетками (адгезия клеток, жизнеспособность и морфология)	Колориметрический MTT-тест и сканирующая электронная микроскопия	Tut et al. (2022), Hewitt et al. (2019), Araújo et al. (2025)
	Оценка жизнеспособности клеток с использованием Calcein AM, EthD-1 и флуоресцентной микроскопии на 1,3 и 7 сутки	Kayadurmus et al. (2024)
	Оценка клеточной пролиферации с использованием PrestoBlue, анализ ALP	Ghorbani et al. (2024)
Цитотоксичность	MTT тест	Kayadurmus et al. (2024)
	ССК-8 тест	Hu et al. (2022)
Способность к заживлению ран	Исследование заживления ран in vitro (тест на царапины); HaCaT, Nhdf и совместная культура; ширина раны измерялась через 0 и 24 часа с помощью программного обеспечения CellSens (Leica DM IL)	Hewitt et al. (2019)
Элементный состав	Анализатор LECO	Llamas-Unzueta et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2024)
Содержание минералов в золе	Элементный анализ с использованием рентген флуоресцентной спектроскопии, Bruker	Llamas-Unzueta et al. (2022)
Растворимость белка	Растворимость белков в растворах, нарушающих специфические взаимодействия (электростатические, водородные, гидрофобные, дисульфидные), для определения их вклада в структуру образца	Li et al. (2023)
Цвет	Измеритель цвета (CM-700d)	Li et al. (2023)
Летучие органические соединения	Газовая хроматография	Zhao et al. (2025)
In vivo испытания	Испытание подкожной имплантации у крыс и модель инфаркта миокарда у крыс с инъекцией гидрогеля	Hu et al. (2022)

Примечание. *Температура, при которой $G' = 1$ Па, при температурном сканировании от 2 до 60°C с нагревом 1°C/мин.

Note. *Temperature at which $G' = 1$ Pa during temperature ramp from 2 to 60 °C at a heating rate of 1 °C/min.

Оценка реологических и текстурных свойств, микроструктуры и лазерный дифракционный анализ частиц оказались наиболее распространенным в изученных работах, что свидетельствует о их ключевой роли в оценке пригодности материала для 3D-печати. В 77 % работ исследователи изучали предел текучести и/или модули накопления (G') и потерь (G''). Модуль накопления — параметр, отражающий способность материала накапливать энергию в процессе деформации (Riantiningtyas et al., 2021 и др.). Многие авторы отмечают значимость оценки именно этого параметра для понимания устойчивости объекта (его способностью поддерживать структуру) после печати (Daffner et al., 2021a; Daffner et al., 2021b; Zheng et al., 2021). В свою очередь, по результатам текстурного анализа Zheng et al. (2021) рассчитывали модуль Юнга как наклон кривой напряжение-деформация, который, согласно авторам, оказался тем критерием, который определяет устойчивость материала к печати. Аналогичное подтверждается исследованиями Sager et al. (2020), и Kan et al. (2024).

Исследования микроструктуры различными методами микроскопии, а также рентгеновской дифракцией, которые были проведены в 69 % работ, обусловлены необходимостью оценки взаимодействия компонентов в матрице 3DP-материала, степени структурной упорядоченности и особенностей формирования гелевой сети. Дополнительно в 38 % исследований анализируются дзета-потенциал и размер частиц, что позволяет оценить электростатическую стабильность системы и распределение частиц в дисперсной среде. Эти параметры играют ключевую роль в прогнозировании агрегативной устойчивости материала, его текучести и способности сохранять структуру после экструзии.

Таким образом базовый комбинированный подход к оценке пригодности материала для 3DP должен включать анализ реологических, текстурных свойств и микроструктуры, которые в основном являются экономически доступными процедурами. Кроме того, рядом других исследователей были предложены оригинальные методы для оценки стабильности и прочности напечатанных конструкций, включая анализ циклов замораживания-оттаивания, фотографирование и визуальное наблюдение, а также измерение физических параметров объекта после хранения (Xia et al., 2024; Shang et al., 2023). В другие нераспространенные методы анализа вошли: оценка устойчивости к окислению (Ji et al., 2025; Zhao et al., 2025), термоустойчивость (Xia et

al., 2024; Shi et al., 2025; Feng et al., 2025; Wang et al., 2025), стабильность после центрифугирования (Xia et al., 2024; Lu et al., 2024; Ji et al., 2025).

В случае разработок с конкретным потенциальным применением, например для использования в химической промышленности (Llamas-Unzueta et al., 2024), для доставки биоактивных веществ в составе функциональных продуктов (Joshi et al., 2024; Cheng et al., 2024), или для тканевой инженерии (Tut et al., 2022; Ghorbani et al., 2024), также были использованы специфические методы (анализ элементного состава, эффективность высвобождения биологически активных соединений и взаимодействия клеток с материалами). Кроме того, для других разработок на стыке пищевой науки и медицины также были применены и другие непопулярные для пищевой науки методы, например оценка цитотоксичности с МТТ и ССК-8 тестами, которая позволила определить биосовместимость и безопасность полученных 3DP материалов (Kayadurmus et al., 2024; Hu et al., 2022). В свою очередь, в исследовании Hu et al. (2022) были проведены *in vivo* испытания на крысах для оценки биологической реакции в физиологической среде после инъекций разработанного гидрогеля для 3DP.

Поле применения 3DP чернил с сывороточными белками

Сывороточные белки, благодаря своей универсальности и функциональности, нашли применение в шести ключевых направлениях 3DP, охватывающих как пищевую промышленность, так и биомедицину (Таблица 4).

Направление «персонализированные или кастомизированные продукты» объединило в себе две основные задачи — это разработка питания под индивидуальные нутритивные нужды потребителя (Kamlow et al., 2021; Kan et al., 2023 и др.), а также учет его эстетических ожиданий, связанных с формой, внешним видом и текстурой продукта, что рассматривалось в работах Liu et al. (2019), Chow et al. (2021) и др. При этом идея персонификации может совмещать обе эти задачи в одном продукте (Zhang et al., 2024). Функциональные и персонализированные продукты, согласно авторам, могут иметь общие нутритивные цели — восполнить дефицит полезных веществ, скорректировать физиологические процессы за счет регулярного употребления продуктов, обогащенных биоактивными добавками, а также уменьшить содержание определенных ком-

Таблица 4
Поле применения 3DP чернил с сывороточными белками

Table 4
Application Areas of Whey Protein-Based 3DP Inks

Применение	Примеры работ
Персонализированные или кастомизированные продукты	Du et al. (2021), Daffner et al. (2021a), Daffner et al. (2021b) Shi et al. (2025), Riantiningtyas et al. (2024), Liu et al. (2018), Liu et al. (2021), , Bareen et al. (2023a), Kamlow et al. (2021), Joshi et al. (2024), Chow et al. (2021), Zheng et al. (2024), Kamlow et al. (2022), Liu et al. (2019), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Lu et al. (2024), Kong et al. (2025)
Функциональные продукты питания	Fan et al. (2022), Joshi et al. (2024), Cheng et al. (2024), Cai et al. (2023), Kan et al. (2023), Shang et al. (2023), Kan et al. (2024), Feng et al. (2025), Araújo et al. (2025), Li et al. (2023), Ji et al. (2025)
Питание для людей с дисфагией	Z. Wang et al. (2024), Zhang et al. (2024), Kan et al. (2023), Li et al. (2024), Wang et al. (2025)
Продукты питания или съедобные материалы	Bareen et al. (2021), Uribe-Alvarez et al. (2023), Cai et al. (2022), Chow et al. (2021), Oliveira et al. (2020), Zhu et al. (2021), Shang et al. (2023), Xian et al. (2024), Ghazal et al. (2023), Xu et al. (2023), Sager et al. (2020), W. Li et al. (2021), Liu et al. (2018), Shi et al. (2021), Dong et al. (2024)
Тканевая инженерия, биомедицина или фармацевтика	Tut et al. (2022), Llamas-Unzueta et al. (2022), Ghorbani et al. (2024), Oliveira et al. (2020), Xu et al. (2023), W. Li et al. (2021), Hewitt et al. (2019), Kayadurmus et al. (2024), Hu et al. (2022)
Химическая промышленность	Llamas-Unzueta et al. (2024)

понентов, таких как жир, сахар или соль. В некоторых работах акцент сделан на создании продуктов для целевых групп потребителей, например для людей с дисфагией. Z. Wang et al. (2024) для оценки применимости разработанных напечатанных продуктов в качестве питания для людей с дисфагией, проводили специальный тест по методу IDDSI (International Dysphagia Diet Standardization Initiative/Международная инициатива по стандартизации диеты при дисфагии), аналогично Kan et al. (2023), Zhang et al. (2024), Li et al. (2024).

В производстве персонализированных и функциональных продуктов питания сывороточные белки могут выступать ключевыми компонентами для защиты и доставки биологически активных веществ, обеспечивая их стабилизацию, контроль высвобождения и улучшение биодоступности. Zhang et al. (2024) доказали эффективность изолята сывороточного белка (WPI) в защите пробиотиков в 3D-печатных продуктах, предотвращая их инактивацию в процессе печати и хранения. В свою очередь, Joshi et al. (2024) разработали наноэмульсионные гели на основе WPI с инкапсулированным витамином D3, которые сохраняли стабильность как на этапе хранения, так и при экструзии через сопло 3D-принтера.

В ряде работ авторы не указывали предполагаемого пути реализации их разработанных 3DP чернил (Xia et al., 2024; Zheng et al., 2021; Shen et al., 2023). Однако

по сути работ их гели могут быть использованы как для систем доставки, так и для 3DP пищевых объектов.

Помимо пищевого применения, технологии 3DP на основе сывороточных белков находят широкое применение в биомедицине, тканевой инженерии и промышленности. В частности, сывороточный белок используется для создания каркасных структур, предназначенных для регенерации костной ткани. Исследования Tut et al. (2022) показали, что применение WPI способствует улучшению биосовместимости и поддерживает дифференциацию остеобластов, что критично для эффективного формирования костной ткани. В свою очередь, Ghorbani et al. (2024) использовали β-лактоглобулин (β-LG) в качестве покрытия для полимерных каркасных материалов, что позволило улучшить их механическую стабильность и биоактивность. Разработанные каркасы с WPI и β-LG также продемонстрировали способность к контролируемому высвобождению лекарственных веществ, что делает их перспективными для лечения костных дефектов. В других исследованиях на стыке медицины и пищевой науки с помощью электрохимической техники печати MEW были созданы каркасы из поликапролактона для регенерации кожных тканей (Hewitt et al., 2019); каркасы на основе концентрата сывороточных белков и полимолочной кислоты, которые увеличили выживаемость клеток, степень набухания, и скорость разложения для применения в лечении ран (Kayadurmus et al., 2024); гидрогели, сшитые нецитоток-

сическим методом с высокой биосовместимостью для создания тканевых конструкций, адаптированных к конкретному пациенту (Sümbelli et al., 2020); и метакрилированные гидрогели сывороточного белка с хорошей совместимостью *in vivo* и терапевтическими преимуществами в модели инфаркта миокарда (Hu et al., 2022).

Дополнительные возможности применения 3D-печатных структур на основе сывороточных белков связаны с созданием пористых углеродных материалов, подходящих для биомедицинских целей. Так, Llamas-Unzueta et al. (2022) разработали технологию карбонизации сывороточных паст, позволяющую получать углеродные каркасы с высокой пористостью, обладающие потенциалом для использования в тканевой инженерии. В последующих исследованиях (Llamas-Unzueta et al., 2024) этот метод был адаптирован для создания каталитических мешалок с проницаемыми лопастями. Эти структуры могут применяться в катализе, процессах очистки воды и газов, а также в разработке новых биосовместимых материалов.

Таким образом, исследования в области 3DP на основе сывороточных белков выходят за пределы пищевых технологий и демонстрируют перспективность в создании инновационных решений для биомедицины, тканевой инженерии и промышленного производства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный анализ встраивается в глобальный контекст поиска решений для утилизации молочной сыворотки — побочного продукта, объемы которого продолжают расти параллельно с развитием молочной промышленности. В этом аспекте 3D-печать (3DP) выступает не только как технология Индустрии 4.0, но и как инструмент для создания добавочной стоимости из вторичных ресурсов, что соответствует современным экологическим и экономическим трендам.

Основные результаты обзора подтверждают, что сывороточные белки, особенно изолят (WPI), активно используются в составе рецептур для 3DP материалов благодаря ряду преимуществ (биодоступность, высокая пищевая ценность, биосовместимость, способность к формированию гелей и управляемой молекулярной сборке и др.). Способность WPI формировать стабильные гели, регулировать вязкость и создавать структурные каркасы делает его перспективным компонентом для 3DP-чернил. Однако выявленная концентрация

исследований на WPI с меньшим фокусом на другие обнаруженные компоненты (концентраты сывороточного белка, сухая сыворотка, бета-лактоглобулин, лактоферрин) указывает на недостаточную изученность других форм сывороточных белков, когда, например, гидролизаты, обладая биоактивными свойствами и гибкостью к модификации технологических свойств, могут расширить спектр применений 3DP материалов за счет улучшенной растворимости или функциональности.

Результаты анализа исследуемых свойств 3DP материалов с сывороточными белковыми компонентами в составе в основном совпадал с результатами других обзорных работ (N. Li et al., 2021; Y. Liu et al., 2024; M. Feng et al., 2024; Wu et al., 2024 и др.), которые также выделяли реологию, текстурный профиль, микроструктуру и характер межмолекулярных взаимодействий в качестве ключевых блоков для анализа, при этом отмечая важность последующей оценки напечатанных 3DP объектов. Однако эти работы не представляют отдельного анализа методов и примеров используемого оборудования для оценки этих свойств в рассмотренных эмпирических трудах, что сделано в данном обзоре и значительно облегчает работу исследовательских групп в организации экспериментов.

Среди двух основных направлений, обозначенных в обзоре, доминируют исследования, связанные с пищевыми продуктами (персонализированное и функциональное питание), что вероятно, обусловлено их большей разработанностью в рамках пищевой науки и доступностью применяемых методов. Вторым важным направлением является растущий интерес к биомедицинским приложениям, таким как тканевая инженерия и каркасные системы. В этом контексте сывороточные белки выступают связующим звеном между пищевой и медицинской отраслями. Однако для успешной интеграции данной технологии требуется более глубокое изучение методов управления свойствами 3DP-материалов с сывороточными белковыми компонентами в составе на различных стадиях их обработки и проведение смежных исследовательских работ в междисциплинарных группах.

Ограничения исследования

В настоящем обзоре были рассмотрены лишь некоторые из возможных подходов к управлению свойствами 3DP материалов с сывороточными компонентами в составе, представленных в эмпирических исследовани-

ях. Названия отдельных сывороточных белков не были включены в поисковые запросы, так как слово «whey», которое присутствовало в поисковой стратегии, обычно упоминается при описании белковых фракций сыворотки. Также следует отметить, что в данной работе не рассматривались источники, в которых было мало ценной информации о сыворотке и продуктов ее переработки в контексте 3DP, однако при первичном анализе работ в этих источниках были зафиксированы интересные идеи, которые могут быть актуальны для реализации в молочной промышленности, в том числе для сывороточного сырья. Например, иммобилизация бета-галактозидазы на 3D печатные каркасы для использования в проточных биореакторах (Shao et al., 2023), разработка инструментов для идентификации фальсификата с помощью 3DP (Livas et al., 2021), производство умной пищевой упаковки из биополимеров с использованием 3DP (Wang et al., 2025), получение аэрогелей для регенерации тканей (H. Liu et al., 2024) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный обзор предметного поля подтверждает значительный потенциал сывороточных белков в создании материалов для 3D-печати. Ключевым критерием успеха научных разработок в этой области остается их переход в практическую плоскость, что актуализирует исследования, направленные на оптимизацию рецептов печатных чернил. Для систематизации накопленных знаний предлагается формирование специализированной библиотеки компонентов, основанной на принципах физико-коллоидной химии и пищевой химии, которые формируют понимание выгодных взаимодействий между разными компонентами. Такой подход позволит классифицировать ингредиенты по функциональным свойствам, упростив разработку новых составов.

Перспективным направлением представляется внедрение методов прогнозного моделирования комбинаций

компонентов, что способно автоматизировать подбор ингредиентов с учетом их реологических характеристик, текстурных параметров, особенностей микроструктуры и характерных межмолекулярных взаимодействий. Применение сывороточных белков за пределами пищевой промышленности, например, в биомедицинских каркасных системах, может стать драйвером для создания высокотехнологичных материалов.

Особый интерес вызывает интеграция в рецептуры 3DP материалов других сывороточных белковых ингредиентов, например, гидролизатов, что соответствует текущим трендам международных исследований. Представленный обзор может служить методической основой для научных групп, работающих с сывороткой, предлагая стратегии планирования экспериментов, выбора аналитических методов и генерации инновационных решений. Реализация этих направлений способна ускорить создание конкурентоспособных технологий в области пищевой и смежных отраслей.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Екатерина Ивановна Большакова: разработка методологии; проведение исследования; написание черновика рукописи; визуализация.

Наташа Поклар Ульрих: научное руководство; разработка концепции; курирование данных; валидация результатов; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ekaterina I. Bolshakova: methodology; investigation; writing — original draft; visualization.

Natasha Poklar Ulrich: supervision; conceptualization; data curation; validation; writing — review & editing.

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCE

- Aït-Kaddour, A., Hassoun, A., Tarchi, I., Loudiyi, M., Boukria, O., Cahyana, Y., Ozogul, F., & Khwaldia, K. (2024). Transforming plant-based waste and by-products into valuable products using various "Food Industry 4.0" enabling technologies: A literature review. *Science of The Total Environment*, 955, 176872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176872>
- Araújo, J. F., Fernandes, J.-M., Madalena, D., Gonçalves, R. F. S., Vieira, J. M., Martins, J. T., Vicente, A. A., & Pinheiro, A. C. (2025). Development of 3D-printed foods incorporating riboflavin-loaded whey protein isolate nanostructures: Characterization and in vitro digestion. *Food & Function*, 16(5), 2124–2135. <https://doi.org/10.1039/D4FO05102E>
- Bareen, M. A., Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Bhandari, B. (2021). Assessment of 3D printability of heat acid coagulated milk semi-solids 'soft cheese' by correlating rheological, microstructural, and textural properties. *Journal of Food Engineering*, 300, 110506. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110506>
- Bareen, M. A., Sahu, J. K., Prakash, S., Bhandari, B., & Naik, S. (2023a). A novel approach to produce ready-to-eat sweetmeats with variable textures using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 344, 111410. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111410>
- Bareen, M. A., Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Bhandari, B. (2023b). Correlating process parameters and print accuracy of 3D-printable heat acid coagulated milk semisolids and polyol matrix: Implications for testing methods. *Food Research International*, 167, 112661. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112661>
- Cai, Q., Zhong, Y., Huang, Q., Huang, G., & Lu, X. (2023). Co-incorporation of probiotics into 3D printed custard cream with hydrophilic and hydrophobic bioactives. *Food Hydrocolloids*, 142, 108809. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108809>
- Cai, Q., Zhong, Y., Xu, M., Huang, Q., & Lu, X. (2022). 3D printed high oil custard cream: Effects of whey protein isolate, hydroxypropylated starch, and carrageenan on physicochemical properties and printing performance. *LWT*, 156, 113039. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113039>
- Carvajal-Mena, N., Tabilo-Munizaga, G., Pérez-Won, M., & Lemus-Mondaca, R. (2022). Valorization of salmon industry by-products: Evaluation of salmon skin gelatin as a biomaterial suitable for 3D food printing. *LWT*, 155, 112931. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112931>
- Chaudhary, V., Kajla, P., Verma, D., Singh, T. P., Kothakota, A., Prasath, V. A., Jeevarathinam, G., Kumar, M., Ramniwas, S., Rustagi, S., & Pandiselvam, R. (2023). Valorization of dairy wastes into wonder products by the novel use of microbial cell factories. *Trends in Food Science & Technology*, 142, 104221. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104221>
- Chen, Y., McClements, D. J., Peng, X., Chen, L., Xu, Z., Meng, M., Zhou, X., Zhao, J., & Jin, Z. (2024). Starch as edible ink in 3D printing for food applications: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(2), 456–471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2106546>
- Cheng, Y., Wang, B., Lv, W., Zhong, Y., & Li, G. (2024). Effect of xanthan gum on physicochemical properties and 3D printability of emulsion-filled starch gels. *Food Hydrocolloids*, 149, 109613. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109613>
- Chourasia, R., Phukon, L. C., Abedin, M. M., Padhi, S., Singh, S. P., & Rai, A. K. (2022). Whey valorization by microbial and enzymatic bioprocesses for the production of nutraceuticals and value-added products. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101144. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101144>
- Chow, C. Y., Thybo, C. D., Sager, V. F., Riantiningtyas, R. R., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2021). Printability, stability, and sensory properties of protein-enriched 3D-printed lemon mousse for personalised in-between meals. *Food Hydrocolloids*, 120, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106943>
- Daffner, K., Ong, L., Hanssen, E., Gras, S., & Mills, T. (2021a). Characterising the influence of milk fat towards an application for extrusion-based 3D-printing of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route. *Food Hydrocolloids*, 118, 106642. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106642>
- Daffner, K., Vadodaria, S., Ong, L., Nöbel, S., Gras, S., Norton, I., & Mills, T. (2021b). Design and characterization of casein–whey protein suspensions via the pH–temperature-route for application in extrusion-based 3D-Printing. *Food Hydrocolloids*, 112, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105850>

- Dong, S., Qian, Z., Liu, X., Liu, F., Zhan, Q., Hu, Q., & Zhao, L. (2024). Exploring gelation properties and structural features on 3D printability of compound proteins emulsion gels: Emphasizing pH-regulated non-covalent interactions with xanthan gum. *Food Chemistry*, 461, 141005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141005>
- Du, Y., Zhang, M., & Chen, H. (2021). Effect of whey protein on the 3D printing performance of konjac hybrid gel. *LWT*, 140, 110716. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110716>
- Feng, C., Zhang, M., & Bhandari, B. (2018). Materials Properties of Printable Edible Inks and Printing Parameters Optimization during 3D Printing: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3074–3081. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1481823>
- Feng, M., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Guo, Z. (2024). Influence of components interaction in recombined food gels on 3D printing: A comprehensive review. *Food Hydrocolloids*, 151, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109782>
- Feng, L., Li, M., Dai, Z., Xu, Y., Zhang, Z., Zhang, M., Yu, D., & Li, D. (2025). 3D printed emulsion gels stabilized by whey protein isolate/polysaccharide as sustained-release delivery systems of β -carotene. *Carbohydrate Polymers*, 355, 123429. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123429>
- Fan, F., Li, S., Huang, W., & Ding, J. (2022). Structural characterization and fluidness analysis of lactose/whey protein isolate composite hydrocolloids as printing materials for 3D printing. *Food Research International*, 152, 110908. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110908>
- Ghazal, A. F., Zhang, M., & Guo, Z. (2023). Microwave-induced rapid 4D change in color of 3D printed apple/potato starch gel with red cabbage juice-loaded WPI/GA mixture. *Food Research International*, 172, 113138. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113138>
- Ghobadi, F., Kalantarzadeh, R., Menarbazari, A. A., Salehi, G., Fatahi, Y., Simorgh, S., Orive, G., Dolatshahi-Pirouz, A., & Gholipourmalekabadi, M. (2025). Innovating chitosan-based bioinks for dermal wound healing: Current progress and future prospects. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140013>
- Ghorbani, F., Kim, M., Ghalandari, B., Zhang, M., Varma, S. N., Schöbel, L., Liu, C., & Boccaccini, A. R. (2024). Architecture of β -lactoglobulin coating modulates bioinspired alginate dialdehyde-gelatin/polydopamine scaffolds for subchondral bone regeneration. *Acta Biomaterialia*, 181, 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.04.028>
- Gogoi, D., Kumar, M., & Singh, J. (2024). A comprehensive review on hydrogel-based bio-ink development for tissue engineering scaffolds using 3D printing. *Annals of 3D Printed Medicine*, 15, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2024.100159>
- Gong, P., Yue, S., Wang, J., Xu, K., Yang, W., Li, N., Wang, J., Zhao, Y., Chen, F., & Guo, Y. (2025). Effect of ultrasound synergistic pH shift modification treatment on *Herichium erinaceus* protein structure and its application in 3D printing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139562. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139562>
- Hassoun, A., Tarchi, I., & Ait-Kaddour, A. (2024). Leveraging the potential of fourth industrial revolution technologies to reduce and valorize waste and by-products in the dairy sector. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100927>
- Hewitt, E., Mros, S., Mcconnell, M., Cabral, J., & Ali, A. (2019). Melt-electrowriting with novel milk protein/PCL biomaterials for skin regeneration. *Biomedical Materials*, 14(5). <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ab3344>
- Hu, Z., Cao, W., Shen, L., Sun, Z., Yu, K., Zhu, Q., Ren, T., Zhang, L., Zheng, H., Gao, C., He, Y., Guo, C., Zhu, Y., & Ren, D. (2022). Scalable Milk-Derived Whey Protein Hydrogel as an Implantable Biomaterial. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(25), 28501–28513. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02361>
- Hussain, S., Malakar, S., & Arora, V. K. (2021). Extrusion-Based 3D food printing: Technological approaches, material characteristics, printing stability, and post-processing. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 100–119. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>
- Jeon, E. Y., Kim, Y., Yun, H.-J., Kim, B.-K., & Choi, Y.-S. (2024). 3D printing of materials and printing parameters with animal resources: A review. *Food Science of Animal Resources*, 44(2), 225–238. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e73>
- Ji, Y., Sun, Y., Chang, Y., Ye, H., & Shen, X. (2025). Development and characterization of a high internal phase Pickering emulsion stabilized by whey protein-based nanoparticles with excellent antioxidant activity for 3-dimensional printing. *Journal of Dairy Science*, 108(6), 5611–5627. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26043>

- Joshi, S., Sahu, J. K., Prakash, S., & Naik, S. N. (2024). Modulating the 3D printability of vitamin D3-nanoemulsion-based dairy gels: Influence of emulsifier on gel structure, printing behaviour and vitamin D3 retention. *Journal of Food Engineering*, 373, 112032. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112032>
- Kamlow, M.-A., Holt, T., Spyropoulos, F., & Mills, T. (2022). Release and co-release of model hydrophobic and hydrophilic actives from 3D printed kappa-carrageenan emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 132, 107852. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107852>
- Kamlow, M.-A., Spyropoulos, F., & Mills, T. (2021). 3D printing of kappa-carrageenan emulsion gels. *Food Hydrocolloids for Health*, 1, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100044>
- Kayadurmus, H. M., Rezaei, A., Ilhan, E., Cesur, S., Sahin, A., Gunduz, O., Kalaskar, D. M., & Ekren, N. (2024). Whey protein-loaded 3D-printed poly (lactic) acid scaffolds for wound dressing applications. *Biomedical Materials*, 19(4), 045045. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ad565d>
- Kan, X., Dai, Z., Chen, D., Zeng, X., & Fan, X. (2023). High internal phase emulsion stabilized by whey protein isolate-gum Arabic Maillard conjugate: Characterization and application in 3D printing. *Food Hydrocolloids*, 145, 109137. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109137>
- Kan, X., Zhang, S., Kwok, E., Chu, Y., Chen, L., & Zeng, X. (2024). Granular hydrogels with tunable properties prepared from gum Arabic and protein microgels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273, 132878. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132878>
- Kong, D., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Luo, Z. (2025). Novel heterogeneous 3D printing process of protein-polysaccharide gel containing orange juice sacs: Optimization of material properties and printing parameters. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305, 141277. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141277>
- Li, G., Wang, B., Lv, W., Mu, R., & Zhong, Y. (2024). Effect of induction mode on 3D printing characteristics of whey protein isolate emulsion gel. *Food Hydrocolloids*, 146, 109255. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109255>
- Li, M., Feng, L., Xu, Y., Nie, M., Li, D., Zhou, C., Dai, Z., Zhang, Z., & Zhang, M. (2023). Rheological property, β -carotene stability and 3D printing characteristic of whey protein isolate emulsion gels by adding different polysaccharides. *Food Chemistry*, 414, 135702. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135702>
- Li, N., Qiao, D., Zhao, S., Lin, Q., Zhang, B., & Xie, F. (2021). 3D printing to innovate biopolymer materials for demanding applications: A review. *Materials Today Chemistry*, 20, 100459. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100459>
- Li, W., Martin, G. J. O., & Ashokkumar, M. (2021). Turbulence-induced formation of emulsion gels. *Ultrasonics Sonochemistry*, 81, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105847>
- Liu, L., & Ciftci, O. N. (2021). Effects of high oil compositions and printing parameters on food paste properties and printability in a 3D printing food processing model. *Journal of Food Engineering*, 288, 110135. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110135>
- Liu, H., Xing, F., Yu, P., Zhe, M., Shakya, S., Liu, M., Xiang, Z., Duan, X., & Ritz, U. (2024). Multifunctional aerogel: A unique and advanced biomaterial for tissue regeneration and repair. *Materials & Design*, 243, 113091. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113091>
- Liu, Y., Liu, D., Wei, G., Ma, Y., Bhandari, B., & Zhou, P. (2018). 3D printed milk protein food simulant: Improving the printing performance of milk protein concentration by incorporating whey protein isolate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.018>
- Liu, Y., Zhang, W., Wang, K., Bao, Y., Regenstein, J. M., & Zhou, P. (2019). Fabrication of gel-like emulsions with whey protein isolate using microfluidization: rheological properties and 3D printing performance. *Food and Bioprocess Technology*, 12(12), 1967–1979. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02344-5>
- Liu, Y., Zhang, Y., Cai, L., Zeng, Q., & Wang, P. (2024). Protein and protein-polysaccharide composites-based 3D printing: The properties, roles and opportunities in future functional foods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 272, 132884. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132884>
- Liu, Z., Chen, X., Li, H., Chitrakar, B., Zeng, Y., Hu, L., & Mo, H. (2024). 3D printing of nutritious dysphagia diet: Status and perspectives. *Trends in Food Science and Technology*, 147, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104478>
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science and Technology*, 69, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>

- Livas, D., Trachioti, M., Banou, S., Angelopoulou, M., Economou, A., Prodromidis, M., Petrou, P., Kakabakos, S., & Kokkinos, C. (2021). 3D printed microcell featuring a disposable nanocomposite Sb/Sn immunosensor for quantum dot-based electrochemical determination of adulteration of ewe/goat's cheese with cow's milk. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 334, 129614. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129614>
- Llamas-Unzueta, R., Menéndez, J. A., Suárez, M., Fernández, A., & Montes-Morán, M. A. (2022). From whey robocasting to custom 3D porous carbons. *Additive Manufacturing*, 59, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103083>
- Llamas-Unzueta, R., Reguera-García, A., Sanz, I., Martín, C., Quintanilla, A., Menéndez, J. A., & Montes-Morán, M. A. (2024). 3D printed catalytic stirrers with permeable blades made of porous carbon. *Additive Manufacturing*, 87, 104233. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104233>
- Lu, Y., Schutyser, M. A. I., & Zhang, L. (2024). Enhancing 3D printing performance of O/W emulsions with asparagus fibre. *Future Foods*, 10, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100472>
- Ma, Y., & Zhang, L. (2022). Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: A mini review. *Current Opinion in Food Science*, 44, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>
- Maiz-Fernández, S., Pérez-Álvarez, L., Silván, U., Vilas-Vilela, J. L., & Lanceros-Méndez, S. (2022). pH-Induced 3D Printable Chitosan Hydrogels for Soft Actuation. *Polymers*, 14(3), 650. <https://doi.org/10.3390/polym14030650>
- Mohapatra, J., Kumar, R., Basak, B., Saratale, R. G., Saratale, G. D., Mishra, A., Tripathy, S. K., Jeon, B.-H., & Chakraborty, S. (2025). A review on generation, composition, and valorization of dairy processing sludge: A circular economy-based sustainable approach. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 143, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.08.045>
- Mu, X., Agostinacchio, F., Xiang, N., Pei, Y., Khan, Y., Guo, C., Cebe, P., Motta, A., & Kaplan, D. L. (2021). Recent advances in 3D printing with protein-based inks. *Progress in Polymer Science*, 115, 101375. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101375>
- Oliveira, S. M., Fasolin, L. H., Vicente, A. A., Fuciños, P., & Pastrana, L. M. (2020). Printability, microstructure, and flow dynamics of phase-separated edible 3D inks. *Food Hydrocolloids*, 109, 106120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106120>
- Riantiningtyas, R. R., Sager, V. F., Chow, C. Y., Thybo, C. D., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2021). 3D printing of a high protein yoghurt-based gel: Effect of protein enrichment and gelatine on physical and sensory properties. *Food Research International*, 147, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110517>
- Rong, L., Chen, X., Shen, M., Yang, J., Qi, X., Li, Y., & Xie, J. (2023). The application of 3D printing technology on starch-based product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.015>
- Sager, V. F., Munk, M. B., Hansen, M. S., Bredie, W. L. P., & Ahrné, L. (2020). Formulation of heat-induced whey protein gels for extrusion-based 3D printing. *Foods*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.3390/foods10010008>
- Shang, W., Sun, Y., Song, J., Zhang, P., Hou, Y., Wang, H., & Tan, M. (2023). Novel high internal phase oleogels-in-water pickering emulsions stabilized solely by whey protein isolate for 3D printing and fucoxanthin delivery. *Food Hydrocolloids*, 140, 108609. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108609>
- Shao, Y., Gan, N., Gao, B., & He, B. (2024). Sustainable 3D-printed β -galactosidase immobilization coupled with continuous-flow reactor for efficient lactose-free milk production. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148557. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148557>
- Sharma, D., Manzoor, M., Yadav, P., Sohal, J. S., Aseri, G. K., & Khare, N. (2018). Bio-valorization of dairy whey for bioethanol by stress-tolerant yeast. In *Fungi and their Role in Sustainable Development: Current Perspectives* (pp. 349–366). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7_20
- Shen, C., Chen, W., Li, C., Chen, X., Cui, H., & Lin, L. (2023). 4D printing system stimulated by curcumin/whey protein isolate nanoparticles: A comparative study of sensitive color change and post-processing. *Journal of Food Engineering*, 342, 111357. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111357>
- Shi, X., Liu, J., Liu, Q., Chen, Q., Wang, H., Sun, F., & Kong, B. (2025). Influence of different carrageenan contents on the rheological properties and 3D printing suitability of whey isolate protein-based emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 161, 110839. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110839>

- Shi, Y., Zhang, M., & Bhandari, B. (2021). Effect of addition of beeswax based oleogel on 3D printing of potato starch-protein system. *Food Structure*, 27, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100176>
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (pp. 1–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803917-5.00001-8>
- Sümbelli, Y., Emir Diltemiz, S., Say, M. G., Ünlüer, Ö. B., Ersöz, A., & Say, R. (2021). In situ and non-cytotoxic cross-linking strategy for 3D printable biomaterials. *Soft Matter*, 17(4), 1008–1015. <https://doi.org/10.1039/D0SM01734E>
- Sun, Y., Juncos Bombin, A. D., Boyd, P., Dunne, N., & McCarthy, H. O. (2022). Application of 3D printing & 3D bioprinting for promoting cutaneous wound regeneration. *Bioprinting*, 28, e00230. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2022.e00230>
- Tamo, A. K., Djouonkep, L. D. W., & Selabi, N. B. S. (2024). 3D printing of polysaccharide-based hydrogel scaffolds for tissue engineering applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132123. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132123>
- Taneja, H., Salodkar, S. M., Singh Parmar, A., & Chaudhary, S. (2022). Hydrogel based 3D printing: Bio ink for tissue engineering. *Journal of Molecular Liquids*, 367, 120390. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120390>
- Thakur, R., Yadav, B. K., & Goyal, N. (2023). An insight into recent advancement in plant- and algae-based functional ingredients in 3D food printing ink formulations. *Food and Bioprocess Technology*, 16(9), 1919–1942. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03040-1>
- Tricco, A., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7).
- Tut, T. A., Cesur, S., Ilhan, E., Sahin, A., Yildirim, O. S., & Gunduz, O. (2022). Gentamicin-loaded polyvinyl alcohol/whey protein isolate/hydroxyapatite 3D composite scaffolds with drug delivery capability for bone tissue engineering applications. *European Polymer Journal*, 179, 111580. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111580>
- Uranga, J., Carranza, T., Peñalba, M., Caba, K. de la, & Guerrero, P. (2024). Valorization of agar production residue as a filler in soy protein hydrogels for 3D printing. *International Journal of Bioprinting*, 9(4), 731. <https://doi.org/10.18063/ijb.731>
- Uribe-Alvarez, R., Murphy, C. P., Coleman-Vaughan, C., & O'Shea, N. (2023). Evaluation of ionic calcium and protein concentration on heat- and cold-induced gelation of whey protein isolate gels as a potential food formulation for 3D food printing. *Food Hydrocolloids*, 142, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108777>
- Wang, Y., McClements, D. J., Bai, C., Xu, X., Sun, Q., Jiao, B., Miao, S., Wang, Q., & Dai, L. (2024). Application of proteins in edible inks for 3D food printing: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 153, 104691. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104691>
- Wang, J., Jiang, X., Gan, H., Li, S., Peng, K., Sun, Y., Ma, M., & Yi, Y. (2025). Complexation-driven 3D printable whey protein-lotus root composite gels for dysphagia foods. *Carbohydrate Polymers*, 366, 123864. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123864>
- Wang, Y., Wu, Y., Chen, Z., Zhong, B., & Liu, B. (2025). Intelligent food packaging materials: Principles, types, applications, and hydrophobization. *Food Control*, 171, 111138. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111138>
- Wang, Z., Chen, F., Deng, Y., Tang, X., Li, P., Zhao, Z., Zhang, M., & Liu, G. (2024). Texture characterization of 3D printed fibrous whey protein-starch composite emulsion gels as dysphagia food: A comparative study on starch type. *Food Chemistry*, 458, 140302. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140302>
- Wu, R., Jiang, J., An, F., Ma, X., & Wu, J. (2024). Research progress of 3D printing technology in functional food, powering the future of food. *Trends in Food Science & Technology*, 149, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104545>
- Xia, S., Wang, Q., Rao, Z., Lei, X., Zhao, J., Lei, L., & Ming, J. (2024). High internal phase pickering emulsions stabilized by zein/whey protein nanofibril complexes: Preparation and lycopene loading. *Food Chemistry*, 452, 139564. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139564>
- Xian, D., Wu, L., Lin, K., Liu, P., Wu, S., Yuan, Y., & Xie, F. (2024). Augmenting corn starch gel printability for architectural 3D modeling for customized food. *Food Hydrocolloids*, 156, 110294. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110294>

- Xu, B., Jia, Y., Li, B., Ma, H., & Yang, W. (2023). Ultrastable emulsions constructed by self-assembly of two protein-polyphenol- anionic polysaccharide ternary complexes-stablized high internal phase emulsions. *LWT*, 176, 114517. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114517>
- Zhao, W., Li, Y., Xue, C., & Wei, Z. (2025). Fabrication of emulsion-templated oleogels with whey protein isolate and carboxymethyl chitosan for delivery of Antarctic krill oil. *Food Research International*, 213, 116611. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116611>
- Zhang, Y., Wang, Y., Dai, X., Li, Y., Jiang, B., Li, D., Liu, C., & Feng, Z. (2024). Biointerfacial supramolecular self-assembly of whey protein isolate nanofibrils on probiotic surface to enhance survival and application to 3D printing dysphagia foods. *Food Chemistry*, 460, 140720. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140720>
- Zhang, R., Huang, H., Ai, R., Li, D., Xu, Y., Jin, W., & Luo, Z. (2024). Fabrication of telechelic DNA-bridged food emulsion gel as edible ink for 3D printing. *Food Quality and Safety*, 8. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyad063>
- Zheng, L., Li, D., Wang, L., & Wang, Y. (2024). Tailoring 3D-printed high internal phase emulsion-rice starch gels: Role of amylose in rheology and bioactive stability. *Carbohydrate Polymers*, 331, 121891. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121891>
- Zheng, Z., Zhang, M., & Liu, Z. (2021). Investigation on evaluating the printable height and dimensional stability of food extrusion-based 3D printed foods. *Journal of Food Engineering*, 306, 110636. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110636>
- Zhu, S., Ruiz De Azua, I. V., Feijen, S., Van Der Goot, A. J., Schutyser, M., & Stieger, M. (2021). How macroscopic structure of 3D printed protein bars filled with chocolate influences instrumental and sensory texture. *LWT*, 151, 112155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112155>

ОБ АВТОРАХ

Большакова Екатерина Ивановна, к.т.н., младший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-0387>, Scopus ID: 57881467200, SPIN-код: 9732-9017, e-mail: ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Поклар Ульрих Наташа, PhD, профессор, профессор биотехнического факультета Люблянского университета (1000, Республика Словения, г. Любляна, Конгрессная площадь, д. 12), <https://orcid.org/0000-0002-2731-9973>, Scopus ID: 57192276024, e-mail: natasa.poklar@bf.uni-lj.si

AUTHOR INFORMATION

Bolshakova Ekaterina Ivanovna, Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Scientist, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, All-Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya St., 35, Building 7). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-0387>, Scopus ID: 57881467200, SPIN-code: 9732-9017, e-mail: ekaterina.bolshakova.ac@yandex.ru

Poklar Ulrih Natasa, PhD, Professor, Professor, Biotechnical Faculty, University of Ljubljana (1000, Republic of Slovenia, Ljubljana, Kongresni trg, 12). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2731-9973>, Scopus ID: 57192276024, e-mail: natasa.poklar@bf.uni-lj.si