

Научная статья/Research article

УДК 637.133

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-256-268

Полина Игоревна Королева<sup>1</sup>, Ирина Александровна Барковская<sup>2✉</sup>,  
Светлана Николаевна Туровская<sup>3</sup>, Елена Евгеньевна Илларионова<sup>4</sup>,  
Владимир Владимирович Кондратенко<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Всероссийский НИИ молочной промышленности, Москва, Россия

<sup>1</sup>p\_koroleva@vnimi.org

<sup>2</sup>i\_barkovskaya@vnimi.org

<sup>3</sup>s\_turovskaya@vnimi.org

<sup>4</sup>e\_illarionova@vnimi.org

<sup>5</sup>v\_kondratenko@vnimi.org

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫХ МОДИФИКАЦИЙ БЕЛКА В КОРОВЬЕМ МОЛОКЕ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

Цель исследований – определить термоиндуцированные трансформации белков молока при различных режимах пастеризации. Объекты исследований – образцы обезжиренного молока, пастеризованные при 70, 80 и 90 °С с выдержкой в течение 30 с. В качестве контрольного образца использовали термизованное обезжиренное молоко, обработанное при 45 °С. Оценку изменений белкового профиля проводили методом двумерного электрофореза с последующим анализом цифровых изображений электрофореграмм, полученных с применением сканера Epson Expression 1680 и пакета программного обеспечения ImageMaster 2D Platinum 7. В контрольном образце без термического воздействия детектировано 26 белковых пятен в диапазоне молекулярных масс 10–70 кДа и значений изоэлектрических точек 4,80–9,20 ед. рI, что соответствует нативному профилю молока. В условиях повышения температуры обработки молочной системы происходило существенное уменьшение количества и интенсивности белковых фрагментов и/или их исчезновение в геле до 40 %. Наиболее выраженное снижение интенсивности отмечено для белкового пятна в области 70 кДа, предположительно относящегося к бычьему сывороточному альбумину, которое при температуре 70 °С практически исчезло. Для пятен в зоне молекулярных масс 15–25 кДа, ассоциированных в исследованиях с казеиновыми фракциями, аналогичным образом установлено исчезновение в режиме пастеризации 90 °С. Появление новых окрашенных фрагментов с молекулярной массой 10–20 кДа в условиях температурной нагрузки 90 °С может быть обосновано частичной деградацией белковых компонентов молочного матрикса. Денситометрический анализ выявил снижение интенсивности отдельных белковых пятен до полного исчезновения, при этом суммарная интенсивность всех детектируемых белков в термообработанных образцах снизилась на 77 %. Полученные результаты подтверждают, что обработка молочной системы при температурах выше 65 °С вызывает изменения вторичной и третичной структуры белковых молекул, провоцируя формирование белковых агрегатов и снижение их растворимости в условиях электрофоретического разделения.

**Ключевые слова:** двумерный электрофорез, трансформация белков, маркеры порчи сухого молока, хранимоустойчивость молочных консервов

**Для цитирования:** Королева П.И., Барковская И.А., Туровская С.Н., и др. Идентификация термоиндуцированных модификаций белка в коровьем молоке с помощью двумерного электрофореза // Вестник КрасГАУ. 2026. № 2. С. 256–268. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-256-268.

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке ФГАНУ «ВНИМИ» в рамках выполнения государственного задания FNSS-2025-0001.

Polina Igorevna Koroleva<sup>1</sup>, Irina Aleksandrovna Barkovskaya<sup>2✉</sup>, Svetlana Nikolaevna Turovskaya<sup>3</sup>, Elena Evgenyevna Illarionova<sup>4</sup>, Vladimir Vladimirovich Kondratenko<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>All-Russian Research Institute of Dairy Industry, Moscow, Russia

<sup>1</sup>p\_koroleva@vnimi.org

<sup>2</sup>i\_barkovskaya@vnimi.org

<sup>3</sup>s\_turovskaya@vnimi.org

<sup>4</sup>e\_illarionova@vnimi.org

<sup>5</sup>v\_kondratenko@vnimi.org

## IDENTIFICATION OF THERMOINDUCED PROTEIN MODIFICATIONS IN COW'S MILK USING TWO-DIMENSIONAL ELECTROPHORESIS

*The aim of the study is to determine heat-induced transformations of milk proteins under various pasteurization conditions. The object of the study was skim milk particles pasteurized at 70, 80, and 90 °C for 30 s. Thermal skim milk processed at 45 °C was used as a control sample. Protein profile changes were assessed using two-dimensional electrophoresis, followed by analysis of digital images of electropherograms obtained using an Epson Expression 1680 scanner and ImageMaster 2D Platinum 7 software. In the control image without thermal exposure, 26 protein spots were detected in the main molecular weights of 10–70 kDa and isoelectric points of 4.80–9.20 p.i. units, which corresponds to the native profile of milk. As the liquid system's processing temperature increases, the number and width of protein fragments decreases and/or their disappearance in the gel by up to 40 %. The most pronounced reduction was observed for a protein spot in the 70 kDa region, presumably related to bovine serum albumin, which virtually disappeared at 70 °C. For spots in the molecular weight range of 15–25 kDa, associated in studies with casein fractions, disappearance was similarly established in the pasteurization mode of 90 °C. The appearance of new colored fragments with a molecular weight of 10–20 kDa under a temperature load of 90 °C can be explained by the partial degradation of the protein components of the milk matrix. Densitometric analysis revealed a decrease in the intensity of individual protein spots before they completely disappeared, while the total intensity of all detectable proteins in heat-treated samples decreased by 77 %. The results confirm that processing the milk system at temperatures above 65 °C causes changes in the secondary and tertiary structure of protein molecules, triggering the formation of protein aggregates and reducing their solubility under electrophoretic separation conditions.*

**Keywords:** two-dimensional electrophoresis, protein transformation, spoilage markers of dry milk, shelf-life of canned milk products

**For citation:** Koroleva PI, Barkovskaya IA, Turovskaya SN, et al. Identification of thermoinduced protein modifications in cow's milk using two-dimensional electrophoresis. *Bulletin of KSAU*. 2026;(2):256-268. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-256-268.

**Funding:** the study was supported by the Federal State Budgetary Institution VNIMI as part of state assignment FNSS-2025-0001.

**Введение.** Молочная продукция популярна во всем мире, ее производство растет с каждым годом, несмотря на такие ограничения, как растущий спрос на растительные альтернативы и волатильность цен [1]. В 2024 г. мировое производство молока достигло 982 млн т [2], что при пересчете составляет более 10 % от общего потребляемого белка в мире [3, 4]. Мировая молочная промышленность по состоянию на 2024 г. оценивается в 999,4 млрд долларов США с прогнозируемым ростом до 1,243 трлн долларов США к 2028 г. [5]. Поскольку молоко представляет собой скоропортящуюся пищевую

систему, одним из путей сохранения его качества для длительного хранения и последующего использования является удаление из него воды с помощью различных методов сушки (например распылительной, сублимационной), которые за счет ксероанабиотического эффекта предотвращают рост микроорганизмов и подавляют ферментативные реакции [6–9]. Сухое молоко широко используют для выпуска различных пищевых продуктов для достижения заданных технологических или функциональных свойств, сенсорных характеристик, пищевой ценности [7, 10]. Кроме того, сухое молоко

удобно при транспортировании, оптимизации логистики и маркетинга [10, 11]. Объем мировой торговли сухим обезжиренным молоком и сухим цельным молоком в 2024 г. достиг более 2,5 млн т для каждого вида [2]. Масштабы использования сухого молока в пищевой промышленности побуждают исследователей к более глубокому изучению процессов трансформации составных частей молочной системы, происходящих при производстве сухих молочных консервов, для повышения как его качества [12], так и качества вырабатываемых с использованием сухого молока пищевых продуктов [13].

На качество и технологические свойства сухого молока в первую очередь влияют основные процессы технологического воздействия на молоко сырое при получении сухих форм (пастеризация, сгущение, сушка) [14–16] и последующая длительность и условия хранения [10, 17–19]. Пастеризация является ключевым и критически важным этапом обработки сырого молока, обеспечивающим соответствие готового продукта санитарно-гигиеническим требованиям [20]. В исследовании [21] сообщается о решающем влиянии процесса термообработки на основные структурные и функциональные изменения сухого молока. При этом выбор температурного режима и его длительности должен представлять собой компромисс между эффективностью уничтожения микроорганизмов, сохранением нативных свойств составных частей молока, в т. ч. стабильности белков, и энергосбережением процесса [11]. Согласно [22, 23], в мировой практике сухое обезжиренное молоко в зависимости от термообработки перед сгущением ранжируют по 3 классам (низкий – 70 °C/15 с; средний – 85 °C/60 с или 90–105 °C/30 с; высокий – 90 °C/5 мин или 120 °C/1–2 мин) на основе значений индекса азота сывороточного белка (не менее 6,00; от 1,51 до 5,99; не более 1,50 мг неденатурированного сывороточного белка в 1 г сухого молока соответственно). Перечисленные температурные режимы оказывают различное влияние на основные белки молока (казеины и сывороточные), приводя в большей или меньшей степени к модификации их структуры, образованию новых соединений или придавая им определенные функциональные свойства [24, 25]. В связи с этим ученые проводят различные исследования, связанные с установлением корреляций между температурной нагрузкой на молоко

и изменением белковой фракции, а также технологическими свойствами сухого молока.

Термическое воздействие на молоко приводит к глубоким молекулярным и структурным изменениям белков.  $\alpha$ -лактальбумин,  $\beta$ -лактоглобулин и другие сывороточные белки частично денатурируют при температуре 60–70 °C, что сопровождается потерей свободных SH-групп и увеличением гидрофобности молекул [26]. Ученые в исследовании [26] показали, что при 95 °C нарушается вторичная структура сывороточных белков, происходит снижение содержания сульфгидрильных групп на 75,9 %, а гидрофобность повышается на 44 %. Раскрытие третичной структуры и распад внутримолекулярных связей ведут к образованию агрегатов к-казеина,  $\beta$ -лактоглобулина и других сывороточных белков с задействованием дисульфидных связей [27]. С применением методов рамановской и инфракрасной спектроскопии [26, 28] установлено перераспределение элементов вторичной структуры белков после пастеризации: увеличение количества «рандомных» петель и  $\beta$ -структур при одновременном снижении количества  $\alpha$ -спиралей и  $\beta$ -поворотов. Флуориметрическими методами [29] зафиксировано снижение флуоресценции триптофана, опосредованное денатурацией белков, и нарастание флуоресценции продуктов реакции Майяра. Взаимодействие лактозы с белками молока также показано в работе [30], в которой с использованием масс-спектрометрии (MALDI-TOF, ESI) определены продукты гликирования  $\alpha$ -лактальбумина и  $\beta$ -лактоглобулина: аддукты лактозилина, N $\epsilon$ -(карбоксиметил)лизина и другие окисленные/гликированные фрагменты. Таким образом, тема изучения белковых изменений в молоке достаточно изучена, однако в литературе не встречается информация о полном расшифрованном пептидном профиле белковых пятен, которые выявлены с использованием метода двумерного электрофореза.

**Цель исследования** – изучить термоиндуцированные трансформации белков молока при различной температуре пастеризации для их дальнейшей расшифровки и оценки сохранности детектированных соединений в сухом молоке при его производстве и хранении.

**Задачи:** провести электрофоретическое разделение белков обезжиренного молока, подвергнутого различным режимам пастеризации; денситометрически оценить качественное и количественное изменение белковых фрагментов;

проанализировать влияние температуры на стабильность основных детектируемых белковых пятен; определить термоиндуцированные изменения белков молока при его пастеризации.

**Объекты и методы.** Для исследования влияния термической нагрузки на белковый профиль молока была проведена подготовка образцов путем пастеризации обезжиренного

молока при разных температурах: 70, 80 и 90 °С с выдержкой в течение 30 с. В качестве контроля использовался образец термизованного молока (45 °С).

Объектом исследований являлись образцы обезжиренного молока с различной термической обработкой (табл. 1).

Таблица 1

**Маркировка исследуемых образцов обезжиренного молока**  
**Labeling of the studied samples of skim milk**

Маркировка образца	Описание образца
Контроль	Образец обезжиренного молока без пастеризации, нагретый до 45 °С
M70	Образец пастеризованного обезжиренного молока, обработанный при 70 °С в течение 30 с
M80	Образец пастеризованного обезжиренного молока, обработанный при 80 °С в течение 30 с
M90	Образец пастеризованного обезжиренного молока, обработанный при 90 °С в течение 30 с

Выработку образцов частично проводили с использованием оборудования ЦКП «ВНИМИ». Пастеризацию образцов проводили с применением лабораторной установки, разработанной коллективом авторов ФГАНУ «ВНИМИ».

Для оценки влияния тепловой нагрузки на белковый профиль молока при различных условиях обработки использован двумерный электрофорез в полиакриламидном геле и компьютерная денситометрия.

Двумерный электрофорез с изоэлектрофокусированием в амфолиновом буфере (IEF-PAGE, равновесный вариант) выполняли, как описано ранее [31]. Детекцию белков на двумерных электрофореграммах проводили последовательным окрашиванием кумасси голубым R-250 (CBV R-250) и азотнокислым серебром. Молекулярные массы (ММ) белковых фракций определяли с использованием набора высокоочищенных рекомбинантных белков с молекулярными массами 10–200 кДа «PageRuler™ Unstained Protein Ladder» (#SM0661 – 14 белков) фирмы «Fermentas» (США).

Для оценки общего количества детектируемых белков использовали цифровые изображе-

ния электрофореграммы и/или изображения отдельных фрагментов, полученные с помощью сканирования на Epson Expression 1680 [32]. Сканирование выполняли в следующем режиме: разрешение 300 dpi, 48 bit Color. Полученные цифровые изображения редактировали в графическом редакторе и обсчитывали количественное содержание белков с помощью пакета программ ImageMaster 2D Platinum версий 7 («GE Healthcare», Швейцария). При определении количества белка использовалось не менее 3 электрофореграмм с равным нанесением. Разброс значений оптической плотности составлял не более ± 1,5 %.

Исследования экспериментальных образцов проводили в ЦПК «Промышленные биотехнологии» ФИЦ Биотехнологии РАН.

**Результаты и их обсуждение.** В результате электрофоретического разделения белковых фракций контрольного образца без температурного воздействия (рис. 1, А) детектировано 26 белковых пятен в диапазоне молекулярных масс от 10 до 70 кДа и диапазоне значений изоэлектрической точки (pI) от 4,80 до 9,20.

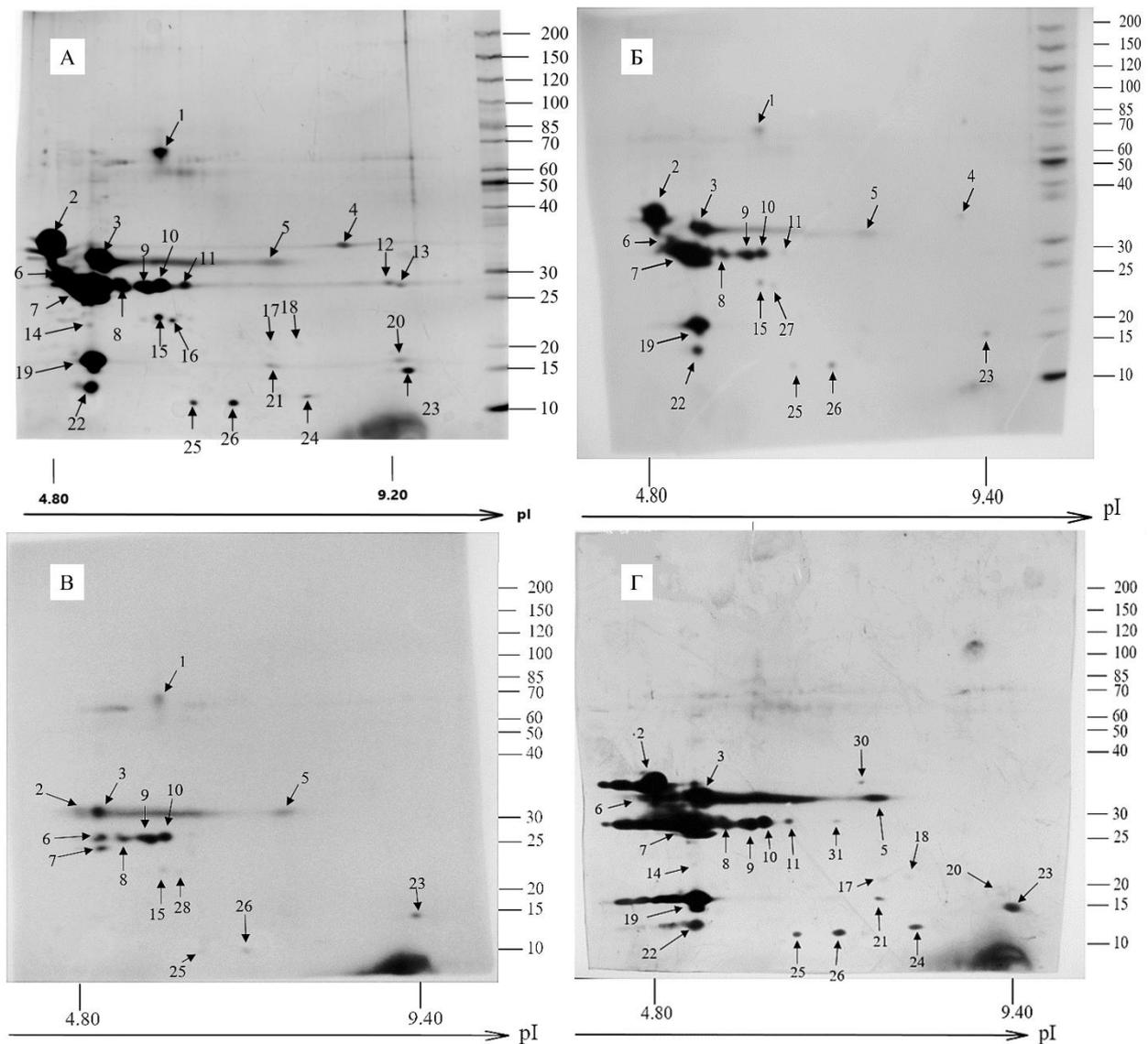


Рис. 1. Двумерная электрофореграмма исследуемых образцов. Стандарты молекулярных масс представлены справа, значения pI отмечены снизу: А – контроль; Б – М70; В – М80; Г – М90  
 A two-dimensional electropherogram of samples under study. Molecular mass standards are shown on the right, and pI values are shown at the bottom. A – Control; Б – M70; В – M80; Г – M90

Из электрофореграмм образцов, подвергнутых воздействию различных режимов тепловой обработки, видно, что при переходе к более высоким температурам нагрева количество белковых фракций значительно снижается. При этом следует обратить внимание на низкую интенсивность окраски геля с образцом М80 краской кумасси (рис. 1, В) в сравнении с образцами, пастеризованными при 70 и 90 °С (рис. 1, Б, Г). По результатам анализа электрофореграмм выявлено уменьшение пятна № 1 вплоть до полного исчезновения при 90 °С. Пятно № 4

перестает детектироваться после нагревания при 70 °С. Пятна № 15, 16, 27 и 28 равномерно снижались в количественном выражении и перестали детектироваться при пастеризации при 90 °С. Белковые отметки под номерами 12 и 13 исчезли при температурной обработке. Интерес представляет появление двух специфичных пятен – № 30 и № 31 (рис. 1, Г) – при параметрах пастеризации 90 °С. Дополнительно проведен денситометрический анализ снижения интенсивности белковых пятен, представленный в таблице 2.

**Денситометрическое сравнение интенсивности пятен при термообработке относительно контроля**  
**Densitometric comparison of spot intensity during heat treatment relative to control**

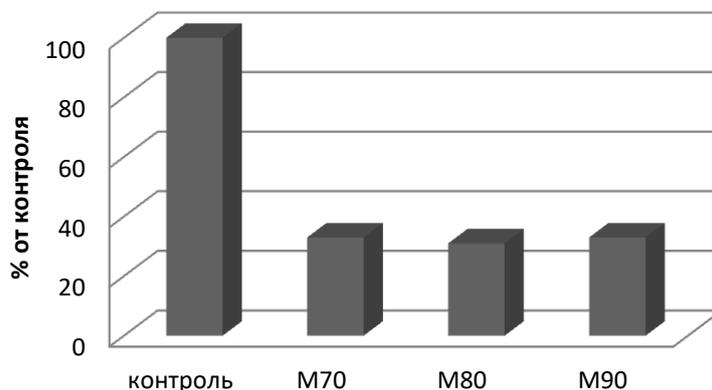
Номер белкового пятна	Количественные изменения		
	70 °С	80 °С	90 °С
1	50 %	50 %	н. д.*
4	н. д.	н. д.	н. д.
15	75 %	60 %	н. д.
16, 27, 28	50 %	40 %	н. д.
30	н. д.	н. д.	Появилось
31	н. д.	н. д.	Появилось

Примечание: \* – не детектировано.

Еще одной особенностью исследуемых образцов являлся длинный трек белкового материала по всей протяженности геля на электрофореграммах с образованием дискретных форм пятен белков. Подводя итог, можно отметить, что эффект термообработки молока сохраняет часть белков, но существенно снижает их количество с образованием ряда промежуточных фрагментов. Результаты требуют дальнейшей

расшифровки пептидного профиля белковых пятен для лучшего понимания трансформации белковых компонентов молочной матрицы.

Полученные в ходе исследования электрофореграммы подвергли обобщенному анализу с помощью компьютерной денситометрии, который показал, что термообработка приводит к снижению общего количества детектируемых белков на 77 % (рис. 2).



*Рис. 2. Результаты оценки снижения интенсивности белковых пятен*  
*Results of the evaluation of the reduction in the intensity of protein spots*

Наиболее интенсивные пятна, зафиксированные при электрофоретическом разделении контрольного образца в области 25–35 кДа при значениях *pI* 4,80–5,50 и в области 20–10 кДа, предположительно соответствуют казеиновым фракциям и сывороточным белкам соответственно [33]. Полученная картина характерна для типичного профиля молока и соотносится с результатами работы [34], в которой авторы выявили преобладание пятен в диапазоне 14–67 кДа и *pI* 4,60–8,80, соответствующих казеиновым фракциям и основному набору сывороточных белков (бычий сывороточный альбумин, α-лактальбумин и β-лактоглобулин). Множественные

слабоокрашенные пятна в зоне молекулярных масс 15–25 кДа могут быть характерны для продуктов микрогетерогенности, а разные значения *pI* – для продуктов фосфорилирования или частичной деградации белковых компонентов молочной системы. Перечисленные эффекты модификации нативной белковой матрицы молока сопоставимы с содержанием исследований [33–35], в которых авторы отмечают влияние температуры на возникновение в системе агрегатов и изменения структуры белков молока. Показанная низкая интенсивность окраски геля с образцом M80 может быть связана с тем, что при нагревании молока до температу-

ры 70–80 °С β-лактоглобулин частично разворачивается и образует с κ-казеином агрегаты [26], устойчивые к SDS [36]. В исследовании [26] установлено, что при 75–95 °С значительно снижается содержание свободных сульфгидрильных групп (до 24 % относительно контроля) и повышается гидрофобность поверхности белковых молекул. В этой связи в гель «проходит» меньше белковых веществ и электрофореграмма плохо окрашивается. Обработка молочной системы при температуре 90 °С способствует формированию менее ковалентных и более гидрофобных агрегатов белковых молекул, которые разрушаются SDS и β-меркаптоэтанолом [36]. Этим также обосновывается более интенсивное окрашивание электрофореграммы образца, пастеризованного при 90 °С (рис. 1, Г), в сравнении с молоком, нагретым до 70 °С (рис. 1, Б).

По результатам анализа электрофореграмм выявлено уменьшение пятна № 1, предположительно относящегося к бычьему сывороточному альбумину (молекулярная масса около 69 кДа) [37]. Эффект снижения доли белка, вплоть до полного исчезновения при 90 °С, может быть ассоциирован с его термолабильностью и потерей нативной структуры при нагревании до температур выше 65 °С [38]. Пятна № 4, 12 и 13, исчезающие при нагревании молока выше 70 °С, располагаются в области молекулярных масс фракций казеина. Согласно данным литературы, исчезновение пятен, принадлежащих казеинам, может объясняться образованием комплексов между мицеллами казеина и фракциями сывороточных белков [39]. Также при нагревании возможна перестройка дисульфидных связей между κ-казеином и β-лактоглобулином и другими сывороточными белками [22]. Еще одним эффектом, протекающим при нагревании, является дефосфорилирование. Все казеины фосфорилированы в различной степени, однако отщепление фосфатной группы может дестабилизировать структуру мицелл и приводить к осаждению [40]. Интерес представляет появление двух специфичных пятен – № 30 и № 31 – при параметрах пастеризации 90 °С. Данный эффект также наблюдали авторы в работе [39], объясняя это тем, что при интенсивном нагревании до температур выше 85 °С белки молока претерпевают необратимые изменения, это выражается в появлении новых белковых пятен.

Значительное снижение белковых компонентов, детектированное с использованием денситометрического анализа электрофореграмм исследуемых образцов, может быть обосновано

тем, что термолабильные белки при нагревании до температур, превышающих 65 °С [26], могут денатурировать или распадаться на более мелкие фрагменты и терять растворимость. Продукты биохимической трансформации в последующем не детектируются при электрофоретическом разделении [39, 41]. Аналогичные тенденции описаны в работе [42], где снижение количества растворимых белков и изменение их профиля в молоке были количественно связаны с температурной обработкой.

Проанализировав полученные результаты и сопоставив их с данными литературы, можно выделить ряд ключевых изменений неферментативной природы, происходящих с белками молока при пастеризации и изменяющих распределение фракций на двумерной электрофореграмме. Под действием температуры с белками молока могут происходить не только конформационные изменения белковой глобулы, но и химические модификации аминокислот, что приводит к смещению изоэлектрических точек. С диаминомонокарбоновыми кислотами аспарагином и глутамином при нагревании может происходить неферментативное деамидирование и образование аспарагиновой и глутаминовой кислот соответственно. Таким образом, вместо незаряженного аминокислотного остатка появляется отрицательно заряженный карбоксилат, что приводит к снижению изоэлектрической точки [40]. J.W. Holland et al. показали [43], что на двумерных электрофореграммах молока появляются пятна α-S<sub>1</sub>-казеина, смещенные в кислотную область, вследствие деамидирования ряда аминокислотных остатков, входящих в состав белка в результате длительного хранения. Изменение подвижности белковых фракций также может объясняться термическим удалением посттрансляционных модификаций у белковых молекул. Например, известно, что казеины обладают различным количеством присоединенных к остаткам серина фосфатных групп. Для каждой фракции казеинов число фосфатных групп отличается: 8 для αS<sub>1</sub>-казеина, 10–13 для αS<sub>2</sub>-казеина, 5 для β-казеина и 1 для κ-казеина [44]. При этом потеря каждого из фосфорных остатков смещает изоэлектрическую точку в основную область и соответственно меняет распределение пятен на двумерном электрофорезе [45]. Также фосфатные группы влияют на способность белка связываться с додецилсульфатом натрия, их потеря снижает это свойство, следовательно, снижается и подвижность белка в полиакриламидном геле, и

белковое пятно фиксируется в области больших молекулярных масс. Лактозилирование белков является так же, как и вышеописанные, ферментативным процессом, протекающим при нагревании молока. Данное биохимическое превращение является начальной стадией реакции Майяра и характеризуется связыванием лактозы и  $\epsilon$ -аминогруппами лизина [46]. Таким образом, процесс лактозилирования белков под воздействием температуры может способствовать изменению результирующей картины на двумерном электрофореze, поскольку каждая молекула лактозы добавляет к молекулярной массе аминокислотной последовательности белка 324 Да. В работе [47] авторы отмечают, что для белков с невысокой молекулярной массой, таких как  $\alpha$ -лактальбумин (14 кДа) и  $\beta$ -лактоглобулин (18 кДа), процесс реагирования с лактозой приводит к образованию новых фракций при анализе трансформаций с использованием метода электрофоретического разделения. При этом каждый последующий присоединенный остаток лактозы формирует в геле новое пятно, в результате чего наблюдается вертикальная полоска пятен [46]. Также стоит отметить, что молекулярные массы фракций казеина отличаются от представленных в научной литературе в большую сторону. Причиной такого поведения белков в геле может быть их аминокислотный состав. Фракции казеина содержат большое количество остатков пролина [48], который вызывает излом вторичной структуры белка и препятствует компактной «упаковке» белковых молекул. Кроме того, отсутствие дисульфидных связей в казеинах приводит к слабому взаимодействию с додецилсульфатом натрия, что также не способствует приобретению молекулой полностью вытянутой структуры, снижая подвижность белков в геле.

**Заключение.** В ходе исследований установлено, что термообработка обезжиренного моло-

ка при 70–90 °С приводит к значительному снижению количества растворимых белков и, как следствие, уменьшению интенсивности пятен при детектировании изменений белковых компонентов с использованием метода двумерного электрофореze. Наиболее термолабильными оказались зоны, предположительно принадлежащие бычьему сывороточному альбумину и фракциям казеина, исчезающие при температурах выше 70 °С. Для образцов, пастеризованных при 90 °С, отмечено появление новых фрагментов, которые могут быть ассоциированы с деградационными трансформациями белковой матрицы молока: вторичные структурные перестройки и/или возникновение более коротких аминокислотных последовательностей. Кроме того, изменение поведения белковых молекул в полиакрилмидном геле может быть также ассоциировано с реакциями дефосфорилирования, деамидирования и лактозилирования, ведущими к изменению электрофоретической подвижности белков. Установлено, что суммарное количество детектируемых белков снизилось на 77 % относительно контрольного термизованного образца, что может быть связано с денатурацией и агрегацией отдельных белков, например к-казеина и  $\beta$ -лактоглобулина. Полученные результаты указывают на необходимость проведения дальнейших исследований по идентификации пептидного профиля белковых пятен методами масс-спектрометрии для расшифровки механизмов термоиндуцированных модификаций белков молока, что является целью наших дальнейших исследований. Совокупные данные о трансформации белкового профиля молока позволят в перспективе отследить его сохранность в готовом сухом молоке и в процессе его хранения для создания инструментов прогнозирования остаточного срока годности и определения возможных направлений использования продукта.

#### Список источников

1. Пряничникова Н.С., Абдуллаева Л.В. Обеспечение продовольственной безопасности в сегменте специализированного питания на молочной основе: системный анализ нормативно-правового регулирования // Пищевая промышленность. 2025. № 10. С. 53–57. DOI: 10.52653/PPI.2025.10.10.010.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of food and agriculture 2023: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome: FAO, 2023. Available at: <https://openknowledge.fao.org/items/dea8246a-7374-48a2-884d-5c9d6992faa6>. Accessed: 08.07.2025.
3. Beckett E.L., Cassettari T., Starck C., et al. Dairy milk: There are alternatives but no equivalents // Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12, N 10. P. 8470–8482.

4. Silva M.G., de Paula I.L., Stephani R., et al. Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2021. Vol. 52, N 12. P. 2444–2478. DOI: 10.1002/jrs.6214.
5. Symega. Top dairy industry trends 2025. Available at: <https://symega.com/blog/top-dairy-industry-trends-2025>. Accessed: 08.07.2025.
6. Pugliese A., Cabassi G., Chiavaro E., et al. Physical characterization of whole and skim dried milk powders // *Journal of Food Science and Technology*. 2017. Vol. 54, N 11. P. 3433–3442. DOI: 10.1007/s13197-017-2795-1.
7. Galstyan A.G., Petrov A.N., Illarionova E.E., et al. Effects of critical fluctuations of storage temperature on the quality of dry dairy product // *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, N 12. P. 10779–10789.
8. Schuck P., Jeantet R., Bhandari B., et al. Recent advances in spray drying relevant to the dairy industry: A comprehensive critical review // *Drying Technology*. 2016. Vol. 34, N 15. P. 1773–1790. DOI: 10.1080/07373937.2016.1233114.
9. Гильманов Х.Х., Семипятный В.К., Бигаева А.В., и др., Разработка способа определения в сухом молоке соотношения относительных долей аллелей гена κ-казеина // *Техника и технология пищевых производств*. 2020. Т. 50, № 3. С. 525–535. DOI: 10.21603/2074-9414-2020-3-525-535.
10. Phosanam A., Chandrapala J., Huppertz T., et al. Effect of storage conditions on physicochemical and microstructural properties of skim and whole milk powders // *Powder Technology*. 2020. Vol. 372. P. 394–403. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.020.
11. Алкадур М.И., Пряничникова Н.С., Юрова Е.А., и др. Влияние термизации и пастеризации на качество сухого молока // *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54, № 2. С. 275–284. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2506.
12. Пряничникова Н.С., Хуршудян С.А. Управление качеством и безопасностью сухого молока // *Пищевая промышленность*. 2025. № 3. С. 78–83. DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.015.
13. Галстян А.Г., Петров А.Н., Юрова Е.А., и др. Киберфизические компоненты пищевой метаинженерии // *Вестник Российской академии наук*. 2025. № 6. С. 77–84. DOI: 10.31857/S0869587325060099.
14. Turovskaya S.N., Galstyan A.G., Petrov A.N., et al. Safety of canned milk as an integrated criterion of their technology effectiveness. Russian experience // *Food Systems*. 2018. Vol. 1, N 2. P. 29–54. DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-29-54.
15. Lin Y., Kelly A.L., O'Mahony J.A., et al. Effect of heat treatment during skim milk powder manufacture on the compositional and processing characteristics of reconstituted skim milk and concentrate // *International Dairy Journal*. 2017. Vol. 78. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.idairyj.2017.10.007.
16. Chandan R.C. Dairy processing and quality assurance: an overview // *Dairy Processing and Quality Assurance*. 2015. P. 1–40. DOI: 10.1002/9781118810279.ch01.
17. Phosanam A., Chandrapala J., Zisu B., et al. Storage stability of powdered dairy ingredients: a review // *Drying Technology*. 2021. Vol. 39, N 11. P. 1529–1553. DOI: 10.1080/07373937.2021.1910955.
18. Ryabova A.E., Semipyatnyi V.K., Galstyan A.G. Effects of storage conditions on milk powder properties // *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106, N 10. P. 6741–6758. DOI: 10.3168/jds.2022-23094.
19. Рябова А.Е., Кондратенко В.В. Моделирование процесса самопрессования сухого молока в процессе хранения // *Пищевая промышленность*. 2024. № 9. С. 65–69. DOI: 10.52653/PPI.2024.9.9.013.
20. Rabbani A., Ayyash M., D'Costa C.D., et al. Effect of heat pasteurization and sterilization on milk safety, composition, sensory properties, and nutritional quality // *Foods*. 2025. Vol. 14, N 8. P. 1342. DOI: 10.3390/foods14081342.
21. Schuck P., Le Floch-Fouere C., Jeantet R. Changes in functional properties of milk protein powders: effects of vacuum concentration and drying // *Drying Technology*. 2013. Vol. 31, N 13-14. P. 1578–1591. DOI: 10.1080/07373937.2013.816316.
22. Калугина Д.Н., Юрова Е.А. Обоснование определения индекса азота сывороточного белка для оценки белкового состава сухого молока // *Молочная промышленность*. 2022. № 7. С. 35–37.
23. Алкадур М.И., Петров А.Н., Пряничникова Н.С. Влияние класса термической обработки сухого молока на структуру и свойства ферментированного сгустка // *Пищевая промышленность*. 2024. № 11. С. 82–89. DOI: 10.52653/PPI.2024.11.11.015.

24. Алкадур М.И., Илларионова Е.Е. Влияние класса термообработки сухого молока на переход белка в сыворотку // Пищевая промышленность. 2025. № 3. С. 96–99. DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.018.
25. Lin Y., Kelly A.L., O'Mahony J.A., et al. Effect of heat treatment during skim milk powder manufacture on the compositional and processing characteristics of reconstituted skim milk and concentrate // International Dairy Journal. 2017. Vol. 78. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.idairyj.2017.10.007.
26. Li H., Zhao T., Li H., et al. Effect of heat treatment on the property, structure, and aggregation of skim milk proteins // Frontiers in Nutrition. 2021. Vol. 8. Art. 714869. DOI: 10.3389/fnut.2021.714869.
27. Pesic M.B., Barac M.B., Stanojevic S.P., et al. Heat-induced casein–whey protein interactions at natural pH of milk: a comparison between caprine and bovine milk // Small Ruminant Research. 2012. Vol. 108, N 1-3. P. 77–86. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2012.06.013.
28. Zhang S., Zhang Z., Lin M., et al. Raman spectroscopic characterization of structural changes in heated whey protein isolate upon soluble complex formation with pectin at near neutral pH // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012. Vol. 60, N 48. P. 12029–12035. DOI: 10.1021/jf303780c.
29. Tessier F.J., Gadonna-Widehem P., Laguerre J.C. The fluorimetric FAST method: a simple tool for the optimization of microwave pasteurization of milk // Molecular Nutrition & Food Research. 2006. Vol. 50, N 9. P. 793–798. DOI: 10.1002/mnfr.200500263.
30. Meltretter J., Pischetsrieder M. Application of mass spectrometry for the detection of glycation and oxidation products in milk proteins // Annals of the New York Academy of Sciences. 2008. Vol. 1126. P. 134–140. DOI: 10.1196/annals.1433.022.
31. Santini G., Bonazza F., Pucciarelli S., et al. Proteomic characterization of kefir milk by two-dimensional electrophoresis followed by mass spectrometry // Journal of Mass Spectrometry. 2020. Vol. 55, N 11. Art. e4635. DOI: 10.1002/jms.4635.
32. Kurg K., Planken A., Kurg R. Proteomic and biochemical analysis of extracellular vesicles isolated from blood serum of patients with melanoma // Separations. 2022. Vol. 9, N 4. P. 86. DOI: 10.3390/separations9040086.
33. Agregán R., Echegaray N., López-Pedrouso M., et al. Proteomic advances in milk and dairy products // Molecules. 2021. Vol. 26, N 13. P. 3832. DOI: 10.3390/molecules26133832.
34. Lindmark-Månsson H., Timgren A., Alden G., et al. Two-dimensional gel electrophoresis of proteins and peptides in bovine milk // International Dairy Journal. 2005. Vol. 15, N 2. P. 111–121. DOI: 10.1016/j.idairyj.2004.06.010.
35. Petrova S.Y., Khlgatian S.V., Emelyanova O.Y., et al. Structure and biological functions of milk caseins // Russian Open Medical Journal. 2022. Vol. 11, N 2. P. 209. DOI: 10.15275/rusomj.2022.0209.
36. Jovanovic S., Barac M., Macej O., et al. SDS-PAGE analysis of soluble proteins in reconstituted milk exposed to different heat treatments // Sensors. 2007. Vol. 7, N 3. P. 371–383. DOI: 10.3390/s7030371.
37. UniProt. ALBU\_BOVIN P02769. Available at: <https://uniprot.org/uniprotkb/P02769/entry>. Accessed: 08.07.2025.
38. Jiang B., Jain A., Lu Y., et al. Probing thermal stability of proteins with temperature scanning viscometer // Molecular Pharmaceutics. 2019. Vol. 16, N 8. P. 3687–3693. DOI: 10.1021/acs.molpharmaceut.9b00598.
39. Ćurlej J., Zajác P., Čapla J., et al. The effect of heat treatment on cow's milk protein profiles // Foods. 2022. Vol. 11, N 7. P. 1023. DOI: 10.3390/foods11071023.
40. Krishna T.C., Najda A., Bains A., et al. Influence of ultra-heat treatment on properties of milk proteins // Polymers. 2021. Vol. 13, N 18. P. 3164. DOI: 10.3390/polym13183164.
41. Freire P., Zambrano A., Zamora A., et al. Thermal denaturation of milk whey proteins: a comprehensive review on rapid quantification methods being studied, developed and implemented // Dairy. 2022. Vol. 3, N 3. P. 500–512. DOI: 10.3390/dairy3030036.
42. van den Oever S.P., Mayer H.K. Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products // International Dairy Journal. 2021. Vol. 121. Art. 105097. DOI: 10.1016/j.idairyj.2021.105097.
43. Holland J.W., Gupta R., Deeth H.C., et al. UHT milk contains multiple forms of  $\alpha$ S1-casein that undergo degradative changes during storage // Food Chemistry. 2012. Vol. 133, N 3. P. 689–696.
44. Lai E.P., Tsopmo A. Casein chemistry – structure, functions, and applications // Exploration of Foods and Foodomics. 2025. Vol. 3. Art. 101099. DOI: 10.37349/eff.2025.101099.

45. Rodríguez-Vázquez R., Mouzo D., Zapata C. Phosphoproteome analysis using two-dimensional electrophoresis coupled with chemical dephosphorylation // *Foods*. 2022. Vol. 11, N 19. P. 3119. DOI: 10.3390/foods11193119.
46. Kijewska M., Zawadzka M., Stefanowicz P. High-temperature, solid-phase reaction of  $\alpha$ -amino groups in peptides with lactose and glucose: an alternative mechanism leading to an  $\alpha$ -ketoacyl derivative // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023. Vol. 71, N 14. P. 5796–5803. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c00821.
47. Holland J.W., Gupta R., Deeth H.C., et al. Proteomic analysis of temperature-dependent changes in stored UHT milk // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59, N 5. P. 1837–1846.
48. Balasubramanian S., Mobasser G., Shi L., et al. Production of phosphorylated and functional  $\alpha$ s1-casein in *Escherichia coli* // *Trends in Biotechnology*. 2025. Vol. 43, N 9. P. 2304–2322. DOI: 10.1016/j.tibtech.2025.05.015.

### References

1. Pryanichnikova NS, Abdullaeva LV. Ensuring food security in the segment of specialized milk-based nutrition: a systemic analysis of legal regulation. *Food industry*. 2025;10:53-57. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2025.10.10.010.
2. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of Food and Agriculture 2023: Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses*. Rome: FAO; 2023. Available at: <https://openknowledge.fao.org/items/dea8246a-7374-48a2-884d-5c9d6992faa6>. Accessed: 08.07.2025.
3. Beckett EL, Cassetar T, Starck C, et al. Dairy milk: There are alternatives but no equivalents. *Food Sci Nutr*. 2024;12(10):8470-8482.
4. Silva MG, de Paula IL, Stephani R. et al. Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review. *J Raman Spectrosc*. 2021;52(12):2444-2478. DOI: 10.1002/jrs.6214.
5. Symega. Top dairy industry trends 2025. Available at: <https://symega.com/blog/top-dairy-industry-trends-2025>. Accessed: 08.07.2025.
6. Pugliese A, Cabassi G, Chiavaro E, et al. Physical characterization of whole and skim dried milk powders. *J Food Sci Technol*. 2017;54(11):3433-3442. DOI: 10.1007/s13197-017-2795-1.
7. Galstyan AG, Petrov AN, Illarionova EE, et al. Effects of critical fluctuations of storage temperature on the quality of dry dairy product. *J Dairy Sci*. 2019;102(12):10779-10789. DOI: 10.3168/jds.2019-17229.
8. Schuck P, Jeantet R, Bhandari B, et al. Recent advances in spray drying relevant to the dairy industry: A comprehensive critical review. *Dry Technol*. 2016;34(15):1773-1790. DOI: 10.1080/07373937.2016.1233114.
9. Gilmanov KhKh, Semipyatnyi VK, Bigaeva AV, et al. New determination method for the ratio of the relative proportions of  $\kappa$ -casein alleles in milk powder. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2020;50(3):525-535. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2020-3-525-535.
10. Phosanam A, Chandrapala J, Huppertz T, et al. Effect of storage conditions on physicochemical and microstructural properties of skim and whole milk powders. *Powder Technol*. 2020;372:394-403. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.020.
11. Alkadur MI, Pryanichnikova NS, Yurova EA, et al. Effect of Thermal Treatment and Pasteurization on Milk Powder Quality. *Food Processing Techniques and Technology*. 2024;54(2):275-284. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2506.
12. Pryanichnikova NS, Khurshudyan SA. Quality and safety management of dry milk. *Food industry*. 2025;(3):78-83. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.015.
13. Galstyan AG, Petrov AN, Yurova EA, et al. Cyber-physical components of food meta-engineering. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2025;6:77-84. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869587325060099.
14. Turovskaya SN, Galstyan AG, Petrov AN, et al. Safety of canned milk as an integrated criterion of their technology effectiveness. Russian experience. *Food Systems*. 2018;1(2):29-54. DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-29-54.
15. Lin Y, Kelly AL, O'Mahony JA, et al. Effect of heat treatment during skim milk powder manufacture on the compositional and processing characteristics of reconstituted skim milk and concentrate. *Int Dairy J*. 2017;78:53-64. DOI: 10.1016/j.idairyj.2017.10.007.

16. Chandan RC. Dairy processing and quality assurance: an overview. *Dairy Processing and Quality Assurance*. 2015;1-40. DOI: 10.1002/9781118810279.ch01.
17. Phosanam A, Chandrapala J, Zisu B, et al. Storage stability of powdered dairy ingredients: a review. *Dry Technol*. 2021;39(11):1529-1553. DOI: 10.1080/07373937.2021.1910955.
18. Ryabova AE, Semipyatnyi VK, Galstyan AG. Effects of storage conditions on milk powder properties. *J Dairy Sci*. 2023;106(10):6741-6758. DOI: 10.3168/jds.2022-23094.
19. Ryabova AE, Kondratenko VV. Modeling of the self-pressing process of powdered milk during storage. *Food Processing industry*. 2024;(9):65-69. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2024.9.9.013.
20. Rabbani A, Ayyash M, D'Costa CD, et al. Effect of heat pasteurization and sterilization on milk safety, composition, sensory properties, and nutritional quality. *Foods*. 2025;14(8):1342. DOI: 10.3390/foods14081342.
21. Schuck P, Le Floch-Fouere C, Jeantet R. Changes in functional properties of milk protein powders: effects of vacuum concentration and drying. *Dry Technol*. 2013;31(13-14):1578-1591. DOI: 10.1080/07373937.2013.816316.
22. Kalugina DN, Yurova EA. Rationale for determining the nitrogen index of whey protein to assess the protein composition of milk powder. *Dairy Industry*. 2022;(7):35-37. (In Russ.).
23. Alkadour MI, Petrov AN, Pryanichnikova NS. Influence of the class of thermal treatment of dry milk on the structure and properties of the fermented curd. *Food Processing industry*. 2024;11:82-89. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2024.11.11.015.
24. Alkadour MI, Illarionova EE. Effect of heat treatment class of dry milk on protein transfer to whey. *Food Industry*. 2025;(3):96-99. (In Russ.). DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.018.
25. Lin Y, Kelly AL, O'Mahony JA, et al. Effect of heat treatment during skim milk powder manufacture on the compositional and processing characteristics of reconstituted skim milk and concentrate. *Int Dairy J*. 2017;78:53-64. DOI: 10.1016/j.idairyj.2017.10.007.
26. Li H, Zhao T, Li H, et al. Effect of heat treatment on the property, structure, and aggregation of skim milk proteins. *Front Nutr*. 2021;8:714869. DOI: 10.3389/fnut.2021.714869.
27. Pesic MB, Barac MB, Stanojevic SP, et al. Heat-induced casein – whey protein interactions at natural pH of milk: A comparison between caprine and bovine milk. *Small Rumin Res*. 2012;108(1-3):77-86. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2012.06.013.
28. Zhang S, Zhang Z, Lin M, et al. Raman spectroscopic characterization of structural changes in heated whey protein isolate upon soluble complex formation with pectin at near neutral pH. *J Agric Food Chem*. 2012;60(48):12029-12035. DOI: 10.1021/jf303780c.
29. Tessier FJ, Gadonna-Widehem P, Laguerre JC. The fluorimetric FAST method: A simple tool for the optimization of microwave pasteurization of milk. *Mol Nutr Food Res*. 2006;50(9):793-798. DOI: 10.1002/mnfr.200500263.
30. Meltretter J, Pischetsrieder M. Application of mass spectrometry for the detection of glycation and oxidation products in milk proteins. *Ann N Y Acad Sci*. 2008;1126:134-140. DOI: 10.1196/annals.1433.022.
31. Santini G, Bonazza F, Pucciarelli S, et al. Proteomic characterization of kefir milk by two-dimensional electrophoresis followed by mass spectrometry. *J Mass Spectrom*. 2020;55(11):e4635. DOI: 10.1002/jms.4635.
32. Kurg K, Planken A, Kurg R. Proteomic and biochemical analysis of extracellular vesicles isolated from blood serum of patients with melanoma. *Separations*. 2022;9(4):86. DOI: 10.3390/separations9040086.
33. Agregán R, Echegaray N, López-Pedrouso M, et al. Proteomic advances in milk and dairy products. *Molecules*. 2021;26(13):3832. DOI: 10.3390/molecules26133832.
34. Lindmark-Månsson H, Timgren A, Alden G, et al. Two-dimensional gel electrophoresis of proteins and peptides in bovine milk. *Int Dairy J*. 2005;15(2):111-121. DOI: 10.1016/j.idairyj.2004.06.010.
35. Petrova SY, Khlgatian SV, Emelyanova OY, et al. Structure and biological functions of milk caseins. *Russ Open Med J*. 2022;11(2):209. DOI: 10.15275/rusomj.2022.0209.
36. Jovanovic S, Barac M, Macej O, et al. SDS-PAGE analysis of soluble proteins in reconstituted milk exposed to different heat treatments. *Sensors*. 2007;7(3):371-383. DOI: 10.3390/s7030371.
37. UniProt. ALBU\_BOVIN P02769. Accessed at: <https://uniprot.org/uniprotkb/P02769/entry>. Accessed: 08.07.2025.
38. Jiang B, Jain A, Lu Y, et al. Probing thermal stability of proteins with temperature scanning viscometer. *Mol Pharm*. 2019;16(8):3687-3693. DOI: 10.1021/acs.molpharmaceut.9b00598.

39. Čurlej J, Zajác P, Čapla J, et al. The effect of heat treatment on cow's milk protein profiles. *Foods*. 2022;11(7):1023. DOI: 10.3390/foods11071023.
40. Krishna TC, Najda A, Bains A, et al. Influence of ultra-heat treatment on properties of milk proteins. *Polymers (Basel)*. 2021;13(18):3164. DOI: 10.3390/polym13183164.
41. Freire P, Zambrano A, Zamora A, et al. Thermal denaturation of milk whey proteins: A comprehensive review on rapid quantification methods being studied, developed and implemented. *Dairy*. 2022;3(3):500-512. DOI: 10.3390/dairy3030036.
42. van den Oever SP, Mayer HK. Analytical assessment of the intensity of heat treatment of milk and dairy products. *Int Dairy J*. 2021;121:105097. DOI: 10.1016/j.idairyj.2021.105097.
43. Holland JW, Gupta R, Deeth HC, et al. UHT milk contains multiple forms of  $\alpha$ S1-casein that undergo degradative changes during storage. *Food Chem*. 2012;133(3):689-696.
44. Lai EP, Tsopmo A. Casein chemistry – structure, functions, and applications. *Explor Foods Foodomics*. 2025;3:101099. DOI: 10.37349/eff.2025.101099.
45. Rodríguez-Vázquez R, Mouzo D, Zapata C. Phosphoproteome analysis using two-dimensional electrophoresis coupled with chemical dephosphorylation. *Foods*. 2022;11(19):3119. DOI: 10.3390/foods11193119.
46. Kijewska M, Zawadzka M, Stefanowicz P. High-temperature, solid-phase reaction of  $\alpha$ -amino groups in peptides with lactose and glucose: An alternative mechanism leading to an  $\alpha$ -ketoacyl derivative. *J Agric Food Chem*. 2023;71(14):5796-5803. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c00821.
47. Holland JW, Gupta R, Deeth HC, et al. Proteomic analysis of temperature-dependent changes in stored UHT milk. *J Agric Food Chem*. 2011;59(5):1837-1846.
48. Balasubramanian S, Mobasser G, Shi L, et al. Production of phosphorylated and functional  $\alpha$ s1-casein in *Escherichia coli*. *Trends Biotechnol*. 2025;43(9):2304-2322. DOI: 10.1016/j.tibtech.2025.05.015.

Статья принята к публикации 11.12.2025 / The article accepted for publication 11.12.2025.

Информация об авторах:

**Полина Игоревна Королева**, младший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования, кандидат биологических наук

**Ирина Александровна Барковская**, младший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования

**Светлана Николаевна Туровская**, старший научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования

**Елена Евгеньевна Илларионова**, научный сотрудник лаборатории технологий биотрансформации и консервирования

**Владимир Владимирович Кондратенко**, заведующий лабораторией технологий биотрансформации и консервирования, доктор технических наук

Information about the authors:

**Polina Igorevna Koroleva**, Junior Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, Candidate of Biological Sciences

**Irina Aleksandrovna Barkovskaya**, Junior Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies

**Svetlana Nikolaevna Turovskaya**, Senior Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies

**Elena Evgenyevna Illarionova**, Researcher, Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies

**Vladimir Vladimirovich Kondratenko**, Head of the Laboratory of Biotransformation and Preservation Technologies, Doctor of Technical Sciences

