

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>
<https://elibrary.ru/NSMNBX>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Спектральные маркеры деградации липидного профиля сухого цельного молока при хранении



И. А. Барковская*, П. И. Королёва, А. В. Косарева,
С. Н. Туровская, Е. Е. Рыбакова, В. Ю. Ярышев,
Е. А. Юрова, В. К. Семипятный, А. Г. Галстян

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Принята после рецензирования: 24.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

*e-mail: i_barkovskaya@vniimi.org

© И. А. Барковская, П. И. Королёва, А. В. Косарева,
С. Н. Туровская, Е. Е. Рыбакова, В. Ю. Ярышев, Е. А. Юрова,
В. К. Семипятный, А. Г. Галстян, 2026



Аннотация.

Сухое цельное молоко – один из наиболее востребованных молочных ингредиентов благодаря своей высокой пищевой ценности, длительным срокам хранения и широкому спектру функционально-технологических свойств. Однако наличие значительной доли липидной фракции в продукте обуславливает его высокую чувствительность к процессам окислительной и гидролитической порчи, приводящим к накоплению продуктов деградации молочного жира и ухудшению качества. В связи с этим актуальна разработка экспресс-методов неразрушающего контроля, позволяющих идентифицировать ранние стадии порчи сухого цельного молока. Цель исследования – оценить возможность применения рамановской спектроскопии для регистрации процессов порчи сухого цельного молока при хранении.

Объекты исследования – образцы сухого цельного молока, хранившиеся при температуре $45 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 15 недель (с шагом 3 недели). Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на портативном рамановском спектрометре EnSpectr R785 (ООО «Спектр-М», Россия). Изменение жирнокислотного состава фиксировали методом газовой хроматографии с применением газового хроматографа Кристаллюкс 4000М (ООО «НПФ «Мета-хром», Россия).

Установлено, что наиболее информативны спектральные диапазоны 325–370, 375–425, 800–900 и 2840–2970 cm^{-1} , вместе с тем максимальная статистическая значимость обнаружена для диапазона 800–900 cm^{-1} ($F = 7,36$; $p < 0,001$), отражающего структурные преобразования липидно-белковой составляющей молочной матрицы. Анализ главных компонент показал нелинейный характер спектральных изменений при хранении. Газохроматографическое исследование выявило стабильность жирнокислотного состава за исключением пальмитиновой и стеариновой кислот и изомеров олеиновой кислоты. При этом наибольшая корреляция изменения жирнокислотного состава при хранении характерна для низкочастотного диапазона 325–370 cm^{-1} .

Наиболее тесные корреляции с результатами газовой хроматографии продемонстрировала область 325–370 cm^{-1} . Область 800–900 cm^{-1} , напротив, оказалась лидером по статистической значимости.

Ключевые слова. Сухое цельное молоко, качество, рамановская спектроскопия, жирнокислотный состав

Финансирование. Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания FNSS-2025-0001.

Для цитирования: Барковская И. А., Королёва П. И., Косарева А. В., Туровская С. Н., Рыбакова Е. Е. и др. Спектральные маркеры деградации липидного профиля сухого цельного молока при хранении. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 610–622. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>

Spectral Degradation Markers in Lipid Profile of Whole Milk Powder during Storage



Irina A. Barkovskaya*, Polina I. Koroleva,
Anastasia V. Kosareva, Svetlana N. Turovskaya,
Elizaveta E. Rybakova, Vladislav Yu. Yaryshev,
Elena A. Yurova, Vladislav K. Semipyatniy, Aram G. Galstyan

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Received: 01.06.2026

Revised: 24.08.2026

Accepted: 01.09.2026

*e-mail: i_barkovskaya@vniimi.org

© I.A. Barkovskaya, P.I. Koroleva, A.V. Kosareva, S.N. Turovskaya,
E.E. Rybakova, V.Y. Yaryshev, E.A. Yurova, V.K. Semipyatniy,
A.G. Galstyan, 2026



Abstract.

Whole milk powder is one of the most sought-after dairy ingredients due to its high nutritional value, long shelf life, and wide range of functional and technological properties. However, milk powder is rich in lipids, which makes it sensitive to oxidative and hydrolytic spoilage, resulting in the accumulation of milk fat degradation products and quality deterioration. New rapid, non-destructive testing methods can identify the early stages of spoilage in whole milk powder. This research evaluated the use of Raman spectroscopy for the early detection of spoilage in whole milk powder during storage.

The study featured samples of whole milk powder stored at $45 \pm 2^\circ\text{C}$ for 15 weeks, with analysis performed in 3-week increments. Raman spectra were recorded using a portable EnSpectr R785 Raman spectrometer (Russia). Changes in the fatty acid composition were analyzed using a Crystallux 4000M gas chromatograph (Russia).

The most informative spectral ranges included the regions at 325–370, 375–425, 800–900, and 2840–2970 cm^{-1} . The highest statistical significance belonged to the range of 800–900 cm^{-1} ($F = 7.36$; $p < 0.001$), which reflected the structural transformations of the lipid-protein component of the milk matrix. Principal component analysis (PCA) showed the non linear nature of spectral changes during storage. Gas chromatography analysis revealed a relatively stable fatty acid composition, with the exception of palmitic, stearic, and oleic acid isomers. The strongest correlation with changes in fatty acid composition during storage was observed in the low-frequency range of 325–370 cm^{-1} .

In conclusion, the 325–370 cm^{-1} region exhibited the closest correlations with the gas chromatography results, while the 800–900 cm^{-1} region had the highest statistical significance.

Keywords. Whole milk powder, quality, Raman spectroscopy, fatty acid composition

Funding. The study was conducted under state assignment FNSS-2025-0001.

For citation: Barkovskaya IA, Koroleva PI, Kosareva AV, Turovskaya SN, Rybakova EE, *et al.* Spectral Degradation Markers in Lipid Profile of Whole Milk Powder during Storage. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):610–622. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2661>

Введение

Повышение качества пищевой продукции является одной из приоритетных задач современного этапа развития реального сектора экономики РФ – пищевой промышленности. Эта задача ориентирована на обеспечение населения полноценным питанием для увеличения продолжительности жизни [1, 2]. Среди важных сырьевых компонентов, используемых в различных отраслях пищевой индустрии, – сухие молочные продукты: сухое молоко, сухие концентраты молочных или сывороточных белков, сухая сыворотка, сухой пермеат и др. Наибольшее распространение благодаря масштабы производства и отработанной техно-

логии получило сухое молоко (цельное или обезжиренное) [3–5]. Высокая пищевая ценность и широкий спектр функционально-технологических свойств обуславливают его применение в производстве молочной, мясной, кондитерской и другой продукции [6–9]. Кроме того, длительные сроки годности при соблюдении надлежащих условий хранения и логистические преимущества перед жидкими и концентрированными молочными продуктами определяют особую роль сухого цельного молока (СЦМ) и сухого обезжиренного молока (СОМ) в условиях полярных и приполярных территорий: там они остаются единственным сырьем для производства молочной продукции. В этих регионах

доступ к скоропортящемуся молочному сырью ограничен из-за невозможности полноценного ведения молочного скотоводства [6, 10, 11]. Сухое молоко также входит в номенклатуру пищевой продукции, используемой в качестве гуманитарной помощи по линии МЧС, служит элементом формирования стратегического пищевого запаса и удобно для питания участников длительных экспедиций [12, 13]. Широкая востребованность сухого молока определяет две важные отраслевые задачи: обеспечение стабильности качества и расширение метрик для его контроля.

СЦМ в отличие от СОМ содержит значительную липидную фракцию (более 26 %), что служит одним из основных лимитирующих факторов его сохранности, поскольку данная фракция, состоящая из молочного жира и жироподобных веществ (фосфолипидов, стерин и др.), подвержена гидролитическим (липолизным) и окислительным процессам химического, биохимического или микробиологического происхождения, которые в разной степени инициируются остаточной активностью ферментов, режимами производства, видами упаковочных материалов и условиями окружающей среды в процессе хранения [6, 7, 14–16]. Липолиз приводит к образованию свободных жирных кислот и глицеридов, тогда как окисление способствует накоплению первичных (гидроксипероксидов) и вторичных (малонового диальдегида, оксипинолов и др.) продуктов окисления [7, 14, 16, 17]. Эти процессы (даже при медленной скорости их протекания) неизбежно вызывают негативные последствия для СЦМ: снижение пищевой ценности [17], ухудшение органолептических свойств (появление нехарактерных привкусов и запахов) [18, 19] и функционально-технологических (растворимость, смачиваемость и др.) характеристик [8, 20]. Кроме того, вторичные продукты окисления молочного жира могут инициировать риски для здоровья потребителей, особенно для уязвимых групп населения (дети, люди пожилого возраста и пациенты с различными заболеваниями) [21, 22].

Вследствие этого возникает проблема раннего и оперативного выявления пороков, связанных с негативными процессами, поскольку накопление продуктов порчи имеет индукционный период и сначала проходит практически на молекулярном уровне, не достигая порога, при котором возможно применение органолептического анализа с привлечением специально обученных дегустаторов или использование распространенных титриметрических методов определения кислотных и перекисных чисел. Традиционные методы анализа (ВЭЖХ, ГХ-МС), стандартизованные во многих методиках, обладают достаточно высокой точностью, но требуют сложной пробоподготовки, наличия реактивов, присутствия специалистов высокой квалификации, а также являются длительными и трудоемкими.

В этой связи необходимо проведение комплекса научно-исследовательских мероприятий по разработке и внедрению экспресс-методов неразрушаю-

щего контроля (без пробоподготовки), способных выявлять и диагностировать деградацию СЦМ уже на стадии индукционного периода порчи и тем самым прогнозировать сроки годности, а также определять возможности рационального использования СЦМ в качестве рецептурного компонента в производстве различных видов пищевой продукции.

В последнее десятилетие в аналитических исследованиях пищевой отрасли наблюдается активное применение спектроскопических подходов, направленных на совершенствование существующих и создание новых объективных методов оценки качества, количества и безопасности продукции. Особое место среди них занимает рамановская спектроскопия (РС), основанная на принципе получения «отпечатка пальцев», т. е. структурной информации о молекулах («молекулярного отпечатка»), причем измерения выполняются неинвазивным путем (без разрушающего воздействия на исследуемый образец) [23, 24]. Кроме того, РС обладает еще рядом других преимуществ: возможностью автоматизации и встраивания в технологический процесс, выполнением многопараметрических анализов (даже через прозрачную неабсорбирующую упаковку, в режиме реального времени, независимо от наличия влаги в образце), точностью и быстротой. Комбинирование РС с математической и статистической обработкой (хемометрические методы) и машинным обучением позволяет перейти от простой идентификации составных частей продукции к предиктивному анализу и их диагностике [25, 26]. В основе метода РС лежит неупругое рассеяние монохроматического света (потока фотонов), при котором их энергия изменяется на величину, соответствующую колебательным переходам молекул образца. Получаемый спектр состоит из набора характерных пиков, присущих валентным и деформационным колебаниям конкретных химических связей. В молочной индустрии РС используется для анализа состава (жиров, белков, углеводов) и выявления фальсификации, определения реологических свойств и функционально-технологических характеристик и др., т. е. метод становится все более популярным в качестве надежного инструментария для контроля качества и безопасности продукции. При выявлении деградационных процессов РС чувствительна к изменению жирнокислотного состава, конформационным изменениям структуры белков, накоплению продуктов гликирования и окисления [23, 27].

Несмотря на активное развитие и эффективное применение спектроскопических подходов для анализа молочной продукции, в научно-технической литературе представлено ограниченное количество систематических исследований, посвященных изменению составных частей СЦМ, а именно взаимосвязи спектральных характеристик и процессов порчи (окислительных и гидролитических) в процессе хранения, а также идентификации маркеров ранних стадий деградации сухой молочной матрицы. В опубликованных работах

в основном анализируют восстановленное молоко из сухих систем либо из СЦМ, в которых липидная фракция присутствует в незначительном количестве (менее 1,5 %). Также отсутствует структурированный перечень спектральных маркеров, позволяющих однозначно выявлять и дифференцировать раннюю и активную стадии возникновения пороков. Таким образом, целенаправленное исследование, устанавливающее взаимосвязь между накоплением продуктов деградации и откликами колебательных спектров, является своевременным и актуальным. Цель исследования – оценить возможность применения РС для идентификации процессов порчи сухого цельного молока при хранении.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили образцы сухого цельного молока (СЦМ). Для интенсификации процессов деградации липидного профиля продукта и получения выраженной динамики изменений на протяжении экспериментального периода использовали режим ускоренного хранения при повышенной температуре (45 ± 2 °C), что является общепринятым подходом при исследовании механизмов окислительной порчи пищевых продуктов, в т. ч. СЦМ [28]. Свежевыработанное в производственных условиях СЦМ расфасовано в бумажную многослойную упаковку с полиэтиленовыми вкладышами массой 1000 ± 50 г. Образцы СЦМ закладывали на хранение в климатической камере СМ-70/150-250ТВХ (ООО «СМ-Климат», Россия) при температуре 45 ± 2 °C на срок до 15 недель. Отбор проб проводили каждые 3 недели (через 3, 6, 9, 12 и 15 недель). В качестве контроля выступал образец СЦМ, отобранный до начала эксперимента (нулевая временная точка).

Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на рамановском спектрометре EnSpectr R785 (ООО «Спектр-М», Россия), оснащенном микроскопной приставкой, в диапазоне $200\text{--}3500$ см⁻¹ при длине волны лазера 785 нм и мощности 22 мВт. Из каждой пробы отбирали две навески массой примерно 2–3 г и помещали на предметное стекло без дополнительной пробоподготовки. Регистрировали спектры с трех различных участков навески для каждой из двух навесок. Таким образом, для каждого образца получали 6 спектров. Условия съемки: объектив с увеличением $\times 10$, время экспозиции 1–2 с, 70 накоплений. Калибровку по волновым числам проводили с использованием эталонного образца полистерола (погрешность ± 1 см⁻¹). Измерения выполняли при комнатной температуре. Фон предметного стекла вычитали на этапе предварительной обработки. Дальнейшая обработка спектров включала коррекцию базовой линии методом «rolling ball» (окно 100), сглаживание по Савицкому-Голаю (окно 21, полином 3), интерполяцию на сетку с шагом 1 см⁻¹ и нормализацию по площади.

Статистический анализ проводили на 36 индивидуальных спектрах (6 образцов $\times$ 6 повторностей)

с использованием однофакторного анализа ANOVA и post-hoc теста Тьюки ($p < 0,05$). Для анализа главных компонент (PCA) использовали центрирование по всей области спектра. Обработка спектров и статистический анализ выполнены в Python с использованием SciPy и NumPy и Pandas. Жирнокислотный состав определяли по ГОСТ 32915-2014 на хроматографе Кристаллюкс 4000М (ООО «НПФ «Мета-хром», Россия), погрешность метода – $\pm 0,40$ %.

Далее оценивали корреляцию между спектральными данными и составом жирных кислот. Для каждого информативного спектрального интервала рассчитывали интегральную интенсивность (по сглаженным спектрам) и коэффициент корреляции Пирсона с содержанием отдельных жирных кислот, а также их сумм – насыщенных, моновенасыщенных и полиненасыщенных. В исследовании представлены только корреляции с $R^2 \geq 0,6$ в качестве допустимого уровня корреляции в большинстве исследований. Уровень значимости p рассчитывали для каждой связи; статистически значимыми считали корреляции при $p < 0,05$. Связи с p в диапазоне 0,05–0,07 рассматривали как пограничные и включали в таблицу для полноты представления данных.

Часть исследований выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ, Москва, Россия).

Результаты и их обсуждение

В ходе работы обработаны рамановские спектры образцов сухого цельного молока (СЦМ) с различными сроками хранения при 45 ± 2 °C (3, 6, 9, 12 и 15 недель). На основе нормализованных спектров построены разностные спектры (рис. 1) ($\Delta I = I(\text{образец}) - I(\text{контроль})$), которые позволили визуализировать и количественно оценить спектральные изменения, происходящие в продукте при хранении. В результате анализа разностных спектров выявлено несколько спектральных областей с выраженными изменениями: 325–370 и 375–425; 800–900, 1420–1480 и 2840–2970 см⁻¹. В области ниже 700 см⁻¹ (в частности, 325–370 и 375–425 см⁻¹) наблюдали изменения, связанные с лактозой. Согласно литературным данным, пики ниже 700 см⁻¹ относятся к скелетному сигналу, эндоциклическим и экзоциклическим деформационным колебаниям химических связей лактозы [29]. Изменения в данной области отражают физико-химические процессы, происходящие с углеводной фракцией при хранении, в т. ч. переход лактозы из аморфного состояния в кристаллическое. В области 800–900 см⁻¹ модификации связаны преимущественно с фосфолипидами и структурными перестройками белков. В данном диапазоне регистрируются колебания головных групп фосфолипидов, чувствительных к гидратации и изменениям упаковки липидных цепей [30]. Также вариации в об-

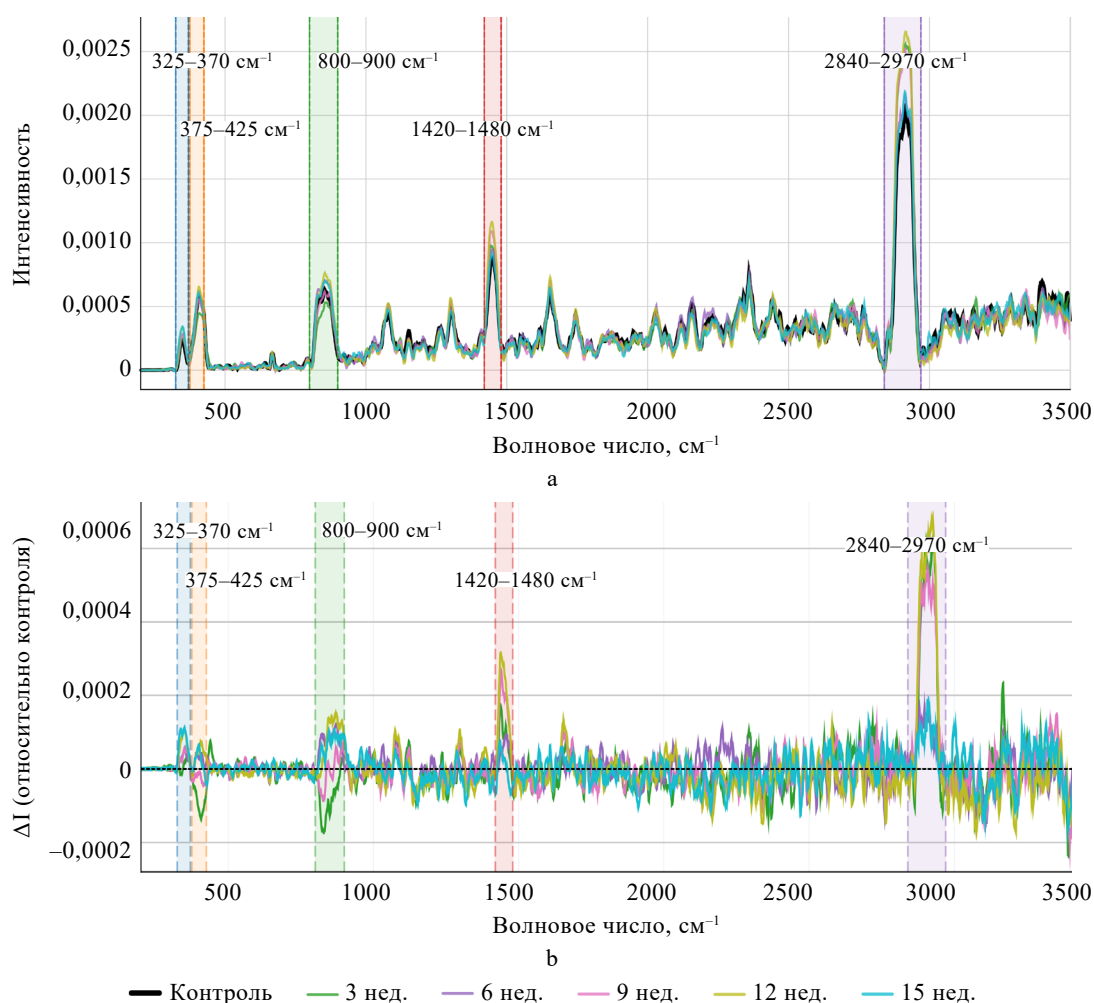


Рисунок 1. Спектры комбинационного рассеяния сухого цельного молока в процессе хранения: а – исходные; б – разностные (ΔI). Цветом выделены анализируемые спектральные участки

Figure 1. Raman scattering spectra of whole milk powder during storage: a – initial; b – difference (ΔI). The spectral regions are color-coded

ласти $800\text{--}900\text{ см}^{-1}$ могут свидетельствовать о структурных перестройках белковой фракции и изменениях в фосфолипидном слое, что может быть связано с дефосфорилированием казеина и изменением его мицеллярной структуры [31]. Область $1420\text{--}1480\text{ см}^{-1}$ соответствует деформационным колебаниям метиленовых (CH_2) и метильных (CH_3) групп жирных кислот и является маркером общего содержания липидов и длины их цепей [32, 33]. Область $2840\text{--}2970\text{ см}^{-1}$, соответствующая валентным колебаниям связей C-H в жирных кислотах, выступает наиболее информативным маркером состояния липидной фазы. Пики при 2850 см^{-1} (симметричное CH_2), 2880 см^{-1} (асимметричное CH_2), 2930 см^{-1} (симметричное CH_3) и 2967 см^{-1} (асимметричное CH_3) отражают степень упаковки и кристаллическости липидных цепей [33]. Изменения в этой области указывают на окислительную порчу молочного жира, которая приводит к нарушению структуры триглицеридов и изменению соотношения насыщенных и ненасыщенных жирных кислот.

Для количественной оценки спектральных изменений при хранении СЦМ использовали интегральную площадь под спектральной кривой, устойчивую к шуму, и максимальную интенсивность пика (более чувствительную к локальным структурным перестройкам). Критерий Фишера (F) применяли для оценки отношения межгруппового разброса к внутригрупповому. Оба подхода дали сходные тенденции, поэтому для отображения выбраны только интенсивности пиков (рис. 2). В области $325\text{--}370\text{ см}^{-1}$ оба параметра одновременно возрастали от контроля к 15-й неделе (интеграл $+60\%$; пик $+40\%$), а в соседней области $375\text{--}425\text{ см}^{-1}$ зафиксировано одинаковое падение на 3-й неделе (-22% для обоих) с последующим восстановлением к исходному уровню. Данные спектральные диапазоны, вероятно, отражают изменения лактозы, а именно ее кристаллизацию при длительном хранении. При этом наиболее информативной оказалась область $800\text{--}900\text{ см}^{-1}$ с максимальной статистической значимостью (интеграл $-F = 7,36$; $p < 0,001$;

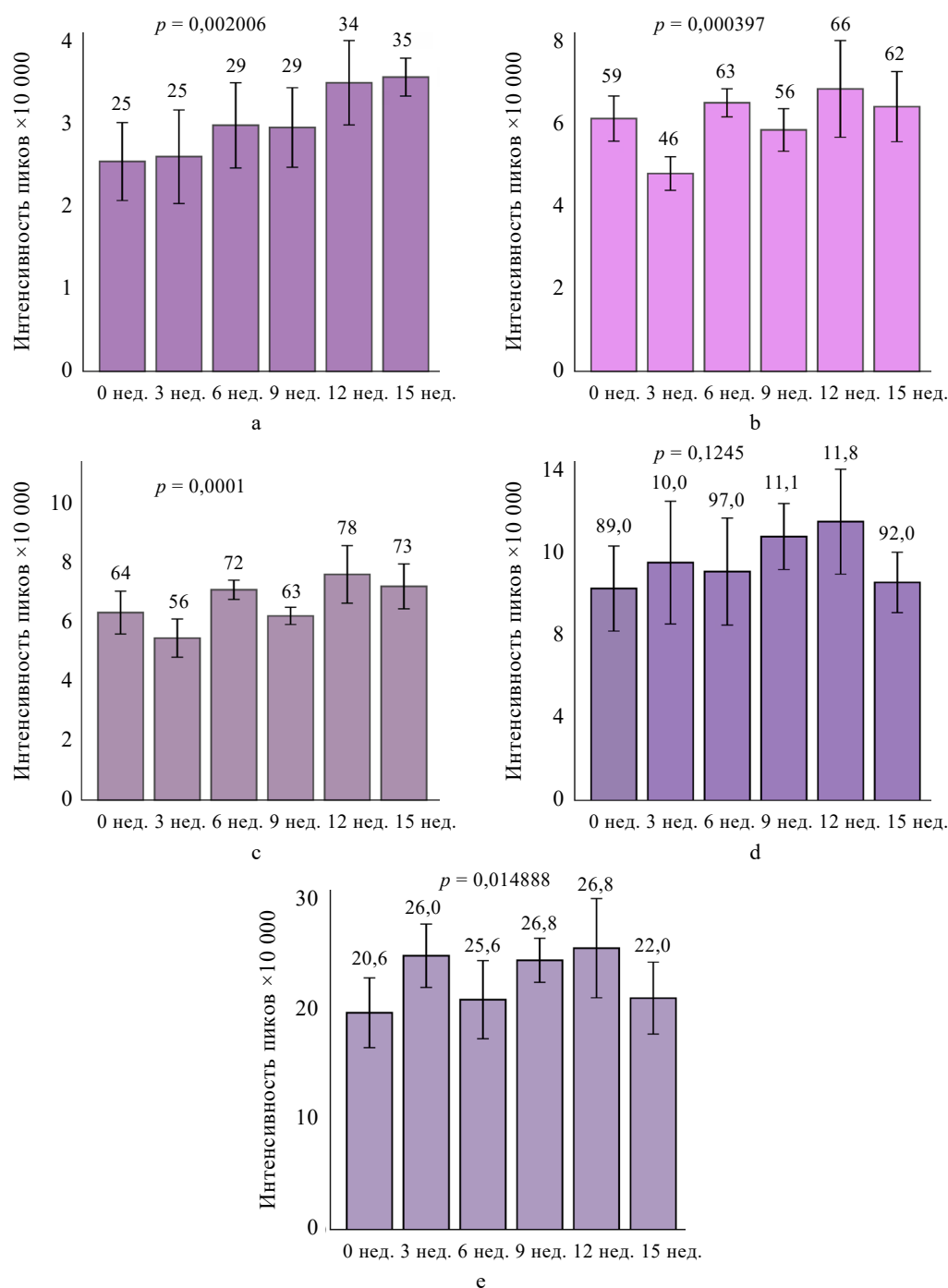


Рисунок 2. Интенсивности пиков ($\times 10\,000$) в анализируемых областях спектра сухого цельного молока при различных сроках хранения: а – 325–370 cm^{-1} ; б – 375–425 cm^{-1} ; в – 800–900 cm^{-1} ; г – 1420–1480 cm^{-1} ; е – 2840–2970 cm^{-1} (p -value, ANOVA)

Figure 2. Peak intensities ($\times 10,000$) in the analyzed spectral regions of whole milk powder at different storage periods: а – 325–370 cm^{-1} ; б – 375–425 cm^{-1} ; в – 800–900 cm^{-1} ; г – 1420–1480 cm^{-1} ; and е – 2840–2970 cm^{-1} (p -value, ANOVA)

пик – $F = 8,53$; $p < 0,001$) и наибольшим числом значимых попарных различий (5 пар). Примечательно, что в этом диапазоне наблюдалось падение интенсивности на 3-й неделе хранения с последующим ростом к 12-й неделе, что может отражать структурные перестройки липид-белковых мембран. Область 2840–

2970 cm^{-1} (C–H валентные колебания жирных кислот) дала слабую, но статистически значимую динамику ($F = 3,40$; $p = 0,015$) при высоком внутригрупповом разбросе и единственной значимой паре (контроль – 12 недель), поэтому ее можно рассматривать лишь как вспомогательный маркер липидных изменений.

Область 1420–1480 cm^{-1} (CH_2 -деформационные колебания) не выявила статистически значимых изменений ($F = 1,90$; $p = 0,125$) и характеризовалась высоким разбросом значений и исключена из дальнейшего анализа. На основе значимых спектральных маркеров проверена возможность выявления общего паттерна изменений для каждого срока хранения с помощью PCA (метод главных компонент) (рис. 3).

Контрольный образец располагается обособленно в правой части графика, что отражает исходное стабильное состояние. Кластер 3-й недели значительно удален от остальных групп, что говорит о его исключительном положении и наиболее выраженных отклонениях на начальном этапе хранения. Кластеры 12 и 15 недель, напротив, близки друг к другу: они находятся в верхней части графика и частично перекрываются, что указывает на сходство спектральных характеристик на этих сроках и формирование общего тренда структурных перестроек. Вероятно, деградация СЦМ замедляется на поздних сроках хранения, поэтому различия менее выражены. Шестинедельные образцы расположены центрально-сверху, пересекаясь с кластерами контроля и поздних сроков. Этот срок можно рассматривать как переходную точку. Кластер 9-й недели перекрывается с 3-й группой в нижней левой области, что может свидетельствовать о частичной обратимости процессов. Наиболее выраженные изменения приходятся на 12-ю неделю: кластер занимает самое верхнее положение по PC2, имеет максимальную площадь и наибольший разброс по PC1 – это указывает на пик гетерогенности и наиболее глубокие структур-

ные перестройки. Таким образом, 3-я неделя выступает критическим триггерным этапом, запускающим каскад изменений, тогда как к 12–15 неделям система переходит в новое стационарное состояние.

PCA выявил общую нелинейную тенденцию: после контроля наблюдаются сильные изменения к 3-й неделе, а пик изменений приходится на 12-ю с последующим замедлением процессов. Четкой линейной закономерности при этом не наблюдается из-за сложности и многостадийности процессов в гетерогенной матрице продукта. Одним из препятствий является то, что липидные области (2840–2970 и 1420–1480 cm^{-1}) характеризуются высокой вариабельностью и перекрыванием полос, что ограничивает информативность рамановской спектроскопии для детального анализа жирнокислотного состава. Поэтому для подтверждения выводов и количественной оценки изменений жирнокислотного профиля дополнительно использовали газовую хроматографию (рис. 4).

Газовая хроматография жирнокислотного состава не показала изменений для большинства жирных кислот. Однако для некоторых компонентов липидной фракции зафиксированы статистически значимые колебания. Среди насыщенных кислот заметнее всего менялась пальмитиновая (C16:0) – через 3 недели ее содержание снизилось на 1,0 %, но к концу срока вернулось к исходному уровню. Сходная картина наблюдалась у стеариновой кислоты (C18:0): падение с 9,74 до 8,77 % к 21-м суткам с последующим возвратом. Из ненасыщенных кислот наиболее существенные сдвиги отмечены для транс-изомера олеиновой

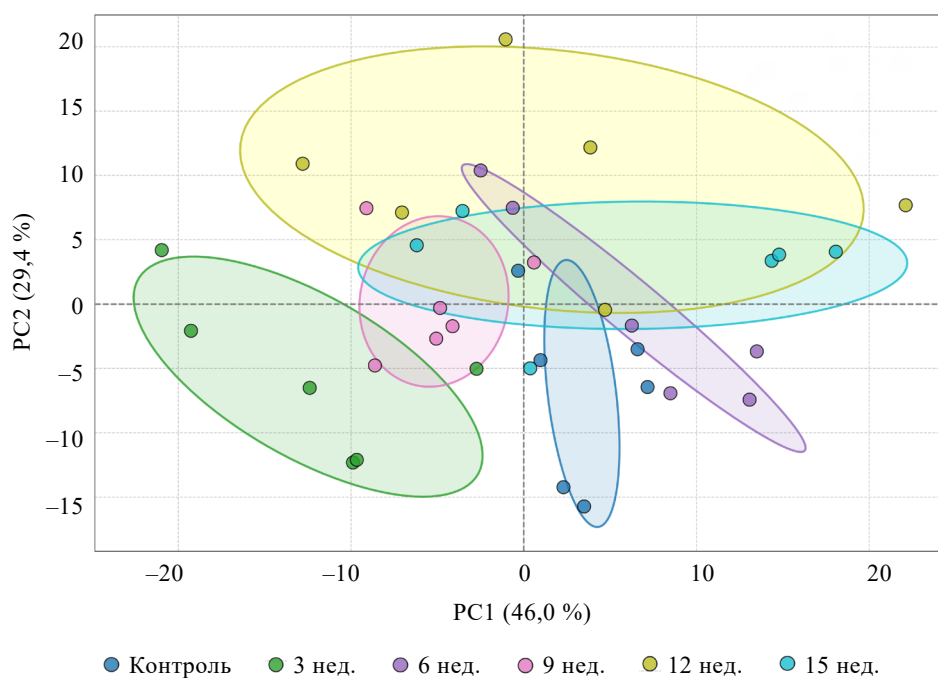


Рисунок 3. PCA-проекция спектральных данных сухого цельного молока для значимых областей

Figure 3. PCA projection for significant spectral regions in whole milk powder

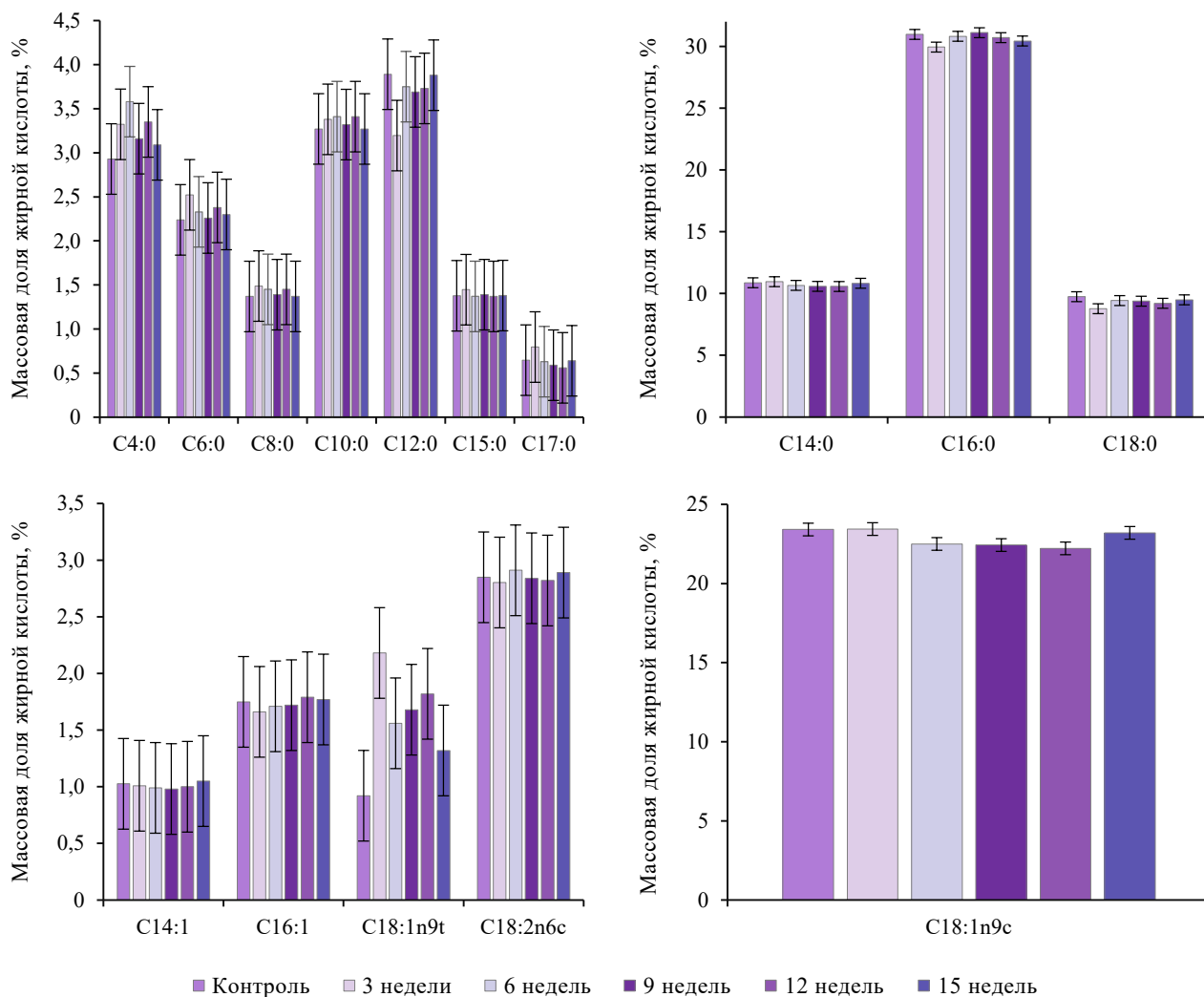


Рисунок 4. Изменение жирнокислотного состава сухого цельного молока в процессе хранения при $45 \pm 2^\circ\text{C}$

Figure 4. Fatty acid composition of whole milk powder during storage at $45 \pm 2^\circ\text{C}$

кислоты (C18:1n9t): его доля за 21 день хранения выросла на 1,26 % (с 0,92 до 2,18 %), что может свидетельствовать о высокой склонности к окислительной порче. В дальнейшем концентрация снижалась до 1,56 % к 6-й неделе, после чего вновь постепенно возрастала, достигая 1,82 % к 12-й неделе хранения, а на заключительном этапе эксперимента содержание жирной кислоты уменьшилось до 1,32 %, но оставалось выше исходного уровня. Для цис-изомера олеиновой кислоты (C18:1n9c) отмечалось значимое снижение в середине периода хранения с последующим восстановлением до исходного уровня. Нелинейная динамика может отражать последовательное протекание процессов изомеризации ненасыщенных жирных кислот, а также липолиза вследствие сохранения остаточной липолитической активности ферментов молока и последующего вовлечения образующихся соединений в трансформацию липидной фазы при хранении СЦМ [34–36]. Так, В. I. Davis *et al.* [35]

изучили изменение молочного жира при хранении сухого козьего цельного молока при 4 и 22°C в течение 2 и 4 месяцев, в результате чего установлено увеличение скорости окисления как в условиях холодильного хранения, так и при комнатной температуре. Значения перекисного числа изменились с $0,099 \pm 0,000$ до $0,115 \pm 0,040$ и $0,148 \pm 0,050$ через 2 и 4 месяца в условиях 4°C , а при 22°C – с $0,107 \pm 0,020$ до $0,166 \pm 0,050$ и $0,182 \pm 0,080$ (увеличение примерно на 70 %) через 2 и 4 месяца соответственно. Массовая доля масляной (C4:0), капроновой (C6:0), каприловой (C8:0) и олеиновой (C18:1) кислот постепенно снижалась, а концентрация миристиновой кислоты (C14:0) увеличилась в процессе хранения как в условиях холодильного хранения, так и при комнатной температуре. Авторы связывают модификации жирнокислотного состава сухого молока при хранении с процессами липолиза и последующим окислением высвободившихся свободных жирных кислот, поскольку

после процесса дегидратации молока сохраняется остаточная липолитическая активность. Результаты С. R. D. Fonseca *et al.* [34] также подтверждают термостабильные свойства липаз молока, установленные при изучении влияния условий хранения сырого козьего молока (1, 3 и 5 дней в холодильнике) с параллельным накоплением титра липолитических бактерий на качество полученного из него сухого цельного молока при хранении в условиях 25 °С в течение 60, 120 и 180 дней. Показано, что термостабильные липазы, сохраняющиеся в готовом продукте, способны инициировать гидролиз триглицеридов с накоплением свободных жирных кислот: концентрация каприловой кислоты (C8:0) возросла на 52,4 % (с $2,1 \pm 0,4$ до $3,2 \pm 0,3$ мг/100 г); каприновой (C10:0) – на 30,8 % (с $1,3 \pm 0,1$ до $1,7 \pm 0,1$ мг/100 г); лауриновой (C12:0) – на 49,1 % (с $5,5 \pm 0,2$ до $8,2 \pm 0,3$ мг/100 г); миристиновой (C14:0) – на 35,5 % (с $3,1 \pm 0,3$ до $4,2 \pm 0,6$ мг/100 г). Данные [21] также согласуются с тем, что трансформации липидной фракции при хранении сухого молока (25 °С) протекают многостадийно и часто нелинейно. В продукте одновременно накапливаются первичные продукты окисления и промежуточные соединения реакции Майяра, образуются летучие соединения и свободные радикалы, а также изменяются цветометрические характеристики: отсутствие единой направленности изменения показателей порчи при выдержке. Перекисное число у части образцов сначала возрастало, затем снижалось, что объясняют переходом от накопленных гидроперекисей к низкомолекулярным вторичным продуктам окисления (альдегидам, кетонам, кислотам). Аналогичная тенденция наблюдается и для показателя вторичного окисления (реакция с тиобарбитуровой кислотой). Кроме того, процесс порчи сухого молока сопровождался накоплением летучих продуктов окисления молочного жира, в особенности гексаналя (основной маркер окисления ненасыщенных жирных кислот): через год хранения концентрация показателя составила $6281,4 \pm 308,9$ мкг/кг в некоторых образцах. Таким образом, приведенные литературные данные свидетельствуют о том, что изменение жирнокислотного состава СЦМ при хранении обусловлено не отдельным процессом, а совокупностью взаимосвязанных реакций остаточного липолиза, изомеризации и последующего окислительного превращения жирных кислот. Нелинейный характер изменения содержания отдельных компонентов липидной фракции, наблюдаемый как в настоящей работе, так и в исследованиях других авторов, отражает последовательную смену стадий деградации молочного жира и подтверждает сложный механизм его трансформации при хранении.

Несмотря на выявленные изменения отдельных компонентов жирнокислотного состава, сами по себе они не позволяют установить, какие именно молекулярные преобразования обуславливают наблюдаемые изменения спектров комбинационного рассеяния.

В связи с этим на следующем этапе работы проведен корреляционный анализ между интегральной интенсивностью наиболее информативных спектральных диапазонов и содержанием отдельных жирных кислот, а также групп жирных кислот, позволяющий оценить взаимосвязь спектральных маркеров с трансформацией липидного профиля сухого цельного молока (табл. 1).

Для диапазона волновых чисел 325–370 см⁻¹ выявлены преимущественно отрицательные корреляции с концентрациями насыщенных жирных кислот, содержащими нечетное число атомов углерода, а также с суммой концентраций мононенасыщенных жирных кислот, наиболее высокая степень взаимосвязи установлена для цис-11,14,17-эйкозотетраеновой кислоты (C20:3n3) ($R^2 = 0,849$). С биохимической точки зрения природа выявленных взаимосвязей остается не вполне очевидной, поскольку большая часть работ, посвященных изучению рамановских спектров молочной системы, указывает, что данный диапазон характеризует трансформации лактозы [29]. Следовательно, полученные закономерности требуют дальнейшего изучения и экспериментального подтверждения. Для диапазона 800–900 см⁻¹ наиболее выраженные корреляции получены с концентрациями миристиновой и цис-олеиновой кислот, что соответствует литературным данным, согласно которым данный диапазон спектра чувствителен к структурным изменениям липидной фазы и компонентов оболочки жировых шариков [30]. Несмотря на отсутствие статистически значимых изменений в интенсивности области 1420–1480 см⁻¹, при сравнении сроков хранения СЦМ выявлены сильные корреляционные связи для содержания отдельных ненасыщенных жирных кислот, особенно линоленовой: $R^2 = 0,910$. В области 2840–2970 см⁻¹, которая характеризует валентные симметричные и асимметричные колебания связей С–Н алифатических цепей жиров [23, 24, 32], проведенный корреляционный анализ выявил преимущественно связи с ненасыщенными длинноцепочечными жирными кислотами. Наиболее высокая положительная корреляция установлена для концентраций линоленовой ($R^2 = 0,815$) и цис-13,16-докозодиеновой ($R^2 = 0,732$) кислот, а для олеиновой и цис-11,14-эйкозодиеновой установлены менее выраженные ($R^2 = 0,626$ и $0,635$ соответственно) отрицательные корреляции. Выявленные взаимосвязи, вероятно, обусловлены изменением конформации алифатических цепей липидов, происходящим в результате термоокислительной модификации при ускоренном хранении сухого цельного молока.

Проведенный корреляционный анализ показал, что различные информативные области рамановского спектра характеризуются неодинаковой чувствительностью к изменениям жирнокислотного состава СЦМ при хранении. Самые сильные корреляции зафиксированы для области 325–370 см⁻¹, которую в литературе связывают с колебаниями гликозидных связей

Таблица 1. Результаты корреляционного анализа интегральной интенсивности спектральных диапазонов с содержанием жирных кислот в сухом цельном молоке

Table 1. Integral intensity of spectral bands vs. fatty acid content in whole milk powder: Correlation analysis

Спектральный диапазон, см ⁻¹	Жирная кислота / группа жирных кислот	R ²	p	Направление связи
325–370	Тридекановая (C13:0)	0,691	0,0402	отрицательное
	Пентадекановая (C15:0)	0,815	0,0138	отрицательное
	Маргариновая (C17:0)	0,693	0,0399	отрицательное
	Генейкозановая (C21:0)	0,678	0,0442	отрицательное
	Трикозановая (C23:0)	0,700	0,0378	отрицательное
	Гамма-линолевая (C18:3n6)	0,626	0,0609	отрицательное
	Цис-11,14,17-эйкозотетраэновая (C20:3n3)	0,849	0,0090	отрицательное
	Сумма мононенасыщенных жирных кислот	0,687	0,0416	отрицательное
	Сумма полиненасыщенных жирных кислот	0,623	0,0620	положительное
800–900	Миристиновая (C14:0)	0,728	0,0307	отрицательное
	Трикозановая (C23:0)	0,649	0,0531	отрицательное
	Олеиновая (C18:1n9c)	0,799	0,0162	отрицательное
	Гамма-линолевая (C18:3n6)	0,651	0,0524	положительное
1420–1480	Миристиновая (C14:0)	0,682	0,0428	отрицательное
	Нервоновая (C24:1)	0,811	0,0143	положительное
	Цис-13,16-докозодиеновая (C22:2)	0,825	0,0123	положительное
	Олеиновая (C18:1n9c)	0,768	0,0220	отрицательное
	Линоленовая (C18:3n3)	0,910	0,0031	положительное
2840–2970	Нервоновая (C24:1)	0,657	0,0503	положительное
	Цис-11,14-эйкозодиеновая (C20:2)	0,635	0,0579	отрицательное
	Цис-13,16-докозодиеновая (C22:2)	0,732	0,0297	положительное
	Олеиновая (C18:1n9c)	0,626	0,0610	отрицательное
	Линоленовая (C18:3n3)	0,815	0,0138	положительное

лактозы и ее структурными сдвигами. Вероятно, здесь отражаются комплексные перестройки матрицы, затрагивающие как углеводную, так и липидную части, поскольку низкочастотная область чувствительна к изменениям межмолекулярных связей. Таким образом, спектральная характеристика определяется не столько изменением концентрации отдельных кислот, сколько перестройкой самих липидных структур. Это открывает перспективу применения рамановской спектроскопии вместе с хемометрикой в качестве инструмента выявления признаков деградации СЦМ.

Выводы

Рамановская спектроскопия позволяет регистрировать молекулярные изменения в сухом цельном молоке при ускоренном хранении. Среди исследованных диапазонов 325–370 и 800–900 см⁻¹ выделяются как наиболее информативные. Первый, который принято связывать с колебаниями химических связей лактозы, неожиданно продемонстрировал наиболее сильные корреляции с изменениями жирнокислотного состава. Второй, связанный с фосфолипидным слоем и скелетными колебаниями С–С, показал максимальную статистическую значимость при сравнении сроков хранения и, вероятно, отражает перестройку липид-белковых мембран. При этом оба диапазона отражают не столько колебания отдельных групп,

сколько упаковку отдельных компонентов матрицы. Вместе с тем газохроматографический анализ продемонстрировал общую стабильность жирнокислотного профиля. Наиболее выраженные сдвиги затрагивают пальмитиновую, стеариновую и олеиновую кислоты (как цис-, так и транс-изомеры), причем динамика этих изменений нелинейная. Это согласуется с тенденцией спектральных изменений, выявленной методом главных компонент, и указывает на многостадийный характер процессов окисления и липолиза.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The authors contributed equally to the research and bear equal responsibility for the information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. 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. [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 Industry*. 2024;(11):82–89. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.015>
2. Пряничникова Н. С. К частным вопросам реализации стратегии 2030 в молочной промышленности. *Молочная промышленность*. 2022. № 9. С. 10–13. [Pryanichnikova NS. On specific issues of implementing the Strategy 2030 in the dairy industry. *Dairy industry*. 2022;(9):10–13. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-09-10-12>
3. Пряничникова Н. С., Хуршудян С. А. Управление качеством и безопасностью сухого молока. *Пищевая промышленность*. 2025. № 3. С. 78–83. [Pryanichnikova NS, Khurshudyun SA. Quality and safety management of milk powder. *Food industry*. 2025;(3):78–83. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.015>
4. Бедретдинова С. А., Пряничникова Н. С., Исаева Е. Д., Абдуллаева Л. В., Савенкова Т. В. Интегративный подход к формированию оценочных критериев качества продуктов мембранного фракционирования молока. *Пищевая промышленность*. 2025. № 12. С. 128–132. [Bedretdinova SA, Pryanichnikova NS, Isaeva ED, Abdullaeva LV, Savenkova TV. Integrative approach to the formation of evaluation criteria for the quality of milk membrane fractionation products. *Food Industry*. 2025;(12):128–132. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.12.12.023>
5. Пряничникова Н. С., Туровская С. Н. Новые стандарты на сухие молочные ингредиенты. Контроль качества продукции. 2025. № 5. С. 20–26. [Pryanichnikova NS, Turovskaya SN. New standards for dry dairy ingredients. *Product Quality Control*. 2025;(5):20–26. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/FOICUG>
6. Phosanam A, Chandrapala J, Huppertz T, Adhikari B, Zisu B. Effect of storage conditions on physicochemical and microstructural properties of skim and whole milk powders. *Powder Technology*. 2020;372:394–403. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.020>
7. Барковская И. А., Туровская С. Н., Блиадзе В. Г., Илларионова Е. Е., Большакова Е. И. Основные механизмы, маркеры порчи и методы их обнаружения применительно к сухим молочным консервам. *Молочная промышленность*. 2025. № 3. С. 15–21. [Barkovskaya IA, Turovskaya SN, Bliadze VG, Illarionova EE, Bolshakova EI. Main spoilage mechanisms, spoilage markers and methods for their detection in dry canned dairy products. *Dairy Industry*. 2025;(3):15–21. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-3-42>
8. Кручинин А. Г., Илларионова Е. Е., Бигаева А. В. Роль технологических свойств сухого молока в формировании качества пищевых систем. *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 8. С. 166–173. [Kruchinin AG, Illarionova EE, Bigaeva AV. Role of technological properties of milk powder in food system quality formation. *Bulletin of KrasGAU*. 2020;(8):166–173. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-8-166-173>
9. Алкадур М. И., Илларионова Е. Е. Влияние класса термообработки сухого молока на переход белка в сыворотку. *Пищевая промышленность*. 2025. № 3. С. 96–99. [Alkadur MI, Illarionova EE. Effect of heat treatment class of dry milk on protein transfer to whey. *Food Industry*. 2025;(3):96–99. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.018>
10. Ryabova AE, Semipyatnyi VK, Galstyan AG. Effects of storage conditions on milk powder properties. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(10):6741–6758. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23094>
11. Рябова А. Е., Кондратенко В. В. Моделирование процесса самопрессования сухого молока в процессе хранения. *Пищевая промышленность*. 2024. № 9. С. 65–69. [Ryabova AE, Kondratenko VV. Modeling of milk powder self-compaction during storage. *Food industry*. 2024;(9):65–69. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.9.9.013>
12. Мяленко Д. М., Федотова О. Б., Агарков А. А., Полетаева П. А. Идентификация частиц микропластика в сухом молоке и сыворотке с применением оптической и электронной микроскопии. *Пищевая промышленность*. 2026. № 4. С. 24–29. [Myalenko DM, Fedotova OB, Agarkov AA, Poletaeva PA. Identification of microplastic particles in powdered milk and whey using optical and electron microscopy. *Food Industry*. 2026;(4):24–29. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2026.4.4.004>
13. Усов Д. Ю., Овчинников Е. А. Основные требования, предъявляемые к хранению продовольствия в особых климатических условиях. *Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. Генерала армии А. В. Хрулева*. 2016. № 3. С. 62–67. [Usov DYU, Ovchinnikov EA. Basic requirements for food storage under special climatic conditions. *Bulletin of the Military Academy of Logistics named after Army General A. V. Khrulev*. 2016;(3):62–67. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YUDULJ>
14. Fan X, Wang C, Cheng M, Wei H, Gao X, *et al.* Markers and mechanisms of deterioration reactions in dairy products. *Food Engineering Reviews*. 2023;15:230–241. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9>
15. Mahmoodani F, Perera CO, Abernethy G, Fedrizzi B, Chen H. Lipid oxidation and vitamin D3 degradation in simulated whole milk powder as influenced by processing and storage. *Food Chemistry*. 2018;261:149–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.043>
16. Sadiq FA, Flint S, He GQ. Microbiota of milk powders and the heat resistance and spoilage potential of aerobic spore-forming bacteria. *International Dairy Journal*. 2018;85:159–168. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.003>

17. Farag MA, Khalifa I, Gamal M, Bakry IA. The chemical composition, production technology, authentication, and QC analysis of dried milk. *International Dairy Journal*. 2022;133:105407. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105407>
18. Ning M, He K, Zhang D, Liu S, Zhang Y, Min J, Wu R, Wu J, Zhang S. HS-SPME-GC-MS combined with multivariate statistical analysis reveals off-flavor composition and biomarker generation mechanism of whole milk powder. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2025;137(B):106962. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106962>
19. Park CW, Drake M. The effect of homogenization pressure on the flavor and flavor stability of whole milk powder. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(7):5195–5205. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12544>
20. Sharma A, Jana AH, Chavan RS. Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2012;11(5):518–528. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00199.x>
21. Li YH, Wang WJ, Guo L, Shao ZP, Xu XJ, *et al.* Comparative study on the characteristics and oxidation stability of commercial milk powder during storage. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(10):8785–8797. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-16089>
22. Phosanam A, Chandrapala J, Adhikari B, Zisu B. Storage stability of powdered dairy ingredients: A review. *Drying Technology*. 2021;39(11):1529–1553. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1910955>
23. Silva MG, de Paula IL, Stephani R, Edwards HGM, de Oliveira LFC. Raman spectroscopy in the quality analysis of dairy products: A literature review. *Journal of Raman Spectroscopy*. 2021;52(12):2444–2478. <https://doi.org/10.1002/jrs.6214>
24. Shao Y, He L, Zheng H. Prediction of phase stability of UHT reconstituted skim milk after ambient storage using Raman spectroscopy. *International Dairy Journal*. 2025;161:106142. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.106142>
25. Huang W, Fan D, Li W, Meng Y, Liu TCY. Rapid evaluation of milk acidity and identification of milk adulteration by Raman spectroscopy combined with chemometrics analysis. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;123:103440. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103440>
26. Барковская И. А., Туровская С. Н., Илларионова Е. Е., Ярышев В. Ю., Блиадзе В. Г., Кондратенко В. В. Сравнение методов ИК- и Раман-спектроскопии для оценки структурных изменений в молоке при тепловой обработке. *Food Metaengineering*. 2025. Т. 3. № 3. С. 21–38. [Barkovskaya IA, Turovskaya SN, Illarionova EE, Yaryshev VYu, Bliadze VG, Kondratenko VV. Comparison of IR and Raman spectroscopy methods for assessing structural changes in milk during heat treatment. *Food Metaengineering*. 2025;3(3):21–38. (In Russ.)] <https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.91>
27. Khan HMH, McCarthy U, Esmonde-White K, Casey I, O'Shea N. Potential of Raman spectroscopy for in-line measurement of raw milk composition. *Food Control*. 2023;152:109862. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109862>
28. Liang JH. Kinetics of fluorescence formation in whole milk powders during oxidation. *Food Chemistry*. 2000;71(4):459–463. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00172-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00172-2)
29. Caponigro V, Marini F, Scannell AGM, Gowen AA. Single-drop technique for lactose prediction in dry milk on metallic surfaces: Comparison of Raman, FT-NIR, and FT-MIR spectral imaging. *Food Control*. 2023;144:109351. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109351>
30. Bicknell-Brown E, Brown KG, Person WB. Configuration-dependent Raman bands of phospholipid surfaces: 2-head group and acyl stretching modes in the 800–900 cm⁻¹ region. *Journal of Raman Spectroscopy*. 1981;11(5):356–362. <https://doi.org/10.1002/jrs.1250110513>
31. Ashton L, Johannessen C, Goodacre R. The importance of protonation in the investigation of protein phosphorylation using Raman Spectroscopy and Raman Optical Activity. *Analytical Chemistry*. 2011;83(20):7978–7983. <https://doi.org/10.1021/ac202041f>
32. De Wolf JR, Lenferink A, Otto C, Bosschaart N. Evaluation of the changes in human milk lipid composition and conformational state with Raman spectroscopy during a breastfeed. *Biomedical Optics Express*. 2021;12(7):3934–3947. <https://doi.org/10.1364/BOE.427646>
33. El-Abassy RM, Eravuchira PJ, Donfack P, Von Der Kammer B, Materny A. Fast determination of milk fat content using Raman spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*. 2011;56(1):3–8. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2010.07.001>
34. Fonseca CRD, Bordin K, Fernandes AM, Rodrigues CEDC, Corassin CH, *et al.* Storage of refrigerated raw goat milk affecting the quality of whole milk powder. *Journal of Dairy Science*. 2013;96(7):4716–4724. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6120>
35. Davis BI, Siddique A, Park YW. Effects of different storage time and temperature on physicochemical properties and fatty acid profiles of commercial powder goat milk products. *Journal of Advances in Dairy Research*. 2017;5(4):1000193. <https://doi.org/10.4172/2329-888X.1000193>
36. Christophe O, Reding R, Leblois J, Grelet C, Pittois D, Soyeurt H, Guignard C, Dehareng F. Going deeper in lipolysis: Prediction of individual free fatty acid contents in milk by mid-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(12):13085–13098. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26829>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Барковская Ирина Александровна / Irina A. Barkovskaya ORCID 0000-0003-4779-1076; eLIBRARY SPIN 9404-4365
Королёва Полина Игоревна / Polina I. Koroleva eLIBRARY SPIN 9646-9334
Косарева Анастасия Валерьевна / Anastasia V. Kosareva
Туровская Светлана Николаевна / Svetlana N. Turovskaya ORCID 0000-0002-5875-9875; eLIBRARY SPIN 6904-5308
Рыбакова Елизавета Евгеньевна / Elizaveta E. Rybakova
Ярышев Владислав Юрьевич / Vladislav Yu. Yaryshev ORCID 0009-0007-7848-4606; eLIBRARY SPIN 4906-1980
Юрова Елена Анатольевна / Elena A. Yurova ORCID 0000-0003-3369-5673; eLIBRARY SPIN 3765-5798
Семипятный Владислав Константинович / Vladislav K. Semipyatniy ORCID 0000-0003-1241-0026;
eLIBRARY SPIN 4246-3862
Галстян Арам Генрихович / Aram G. Galstyan ORCID 0000-0002-0786-2055; eLIBRARY SPIN 9355-5603