



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 535,372:637.07

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008



ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МОЛОКА

Михаил Владимирович Беляков ¹, Игорь Юрьевич Ефременков ²

^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

¹ bmw20100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² matiusharius@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Аннотация. Фракционирование молока повсеместно используется для производства различных продуктов. Спектроскопия видимого и ближнего инфракрасного диапазона может быть использована для качественной оценки фракций молока. Целью работы является исследование фракционного состава молока с помощью оптической фотолюминесцентной спектроскопии и определение наиболее информативных спектральных диапазонов и параметров. В данном исследовании путем ультразвукового разделения были получены фракции молока с более высоким и низким содержанием жира. Измерены спектральные характеристики цельного молока и полученных фракций в диапазоне 230–650 нм на дифракционном спектрофлуориметре CM2203. Спектры возбуждения молока и полученных фракций качественно не отличаются между собой и содержат четыре максимума: 290 нм, 324 нм, 360 нм и 445 нм. Отличия проявляются в количественном соотношении максимумов и интегральных параметров поглощения. Интегральная поглощательная способность H нижней фракции молока превышает аналогичный параметр для верхней на 31,2 % во всем спектральном диапазоне и на 24–44 % – в отдельных диапазонах исследуемого спектра. Спектральные фотолюминесцентные свойства фракционированного молока зависят от содержания жира. Для нижней фракции лучшие фотолюминесцентные свойства (спектральные характеристики и энергетические параметры) вызваны уменьшением тушения люминесценции за счёт изменения концентрации молочного жира. Потоки фотолюминесценции при возбуждении 290 нм, 360 нм и 445 нм статистически достоверно линейно уменьшаются при увеличении содержания жира во фракции или молоке. Наиболее информативной длиной волны возбуждения молока при фракционировании является 360 нм. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики контроля жирности при переработке молока путем фракционирования.

Ключевые слова: фракционирование молока, жиры, люминесценция, оптический мониторинг, поток фотолюминесценции, асимметрия, эксцесс.

Для цитирования: Беляков М. В., Ефременков И. Ю. Оптические спектральные исследования фракционного состава молока // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 53–58. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008. EDN: <https://elibrary.ru/DKQECX>.

Original article

OPTICAL SPECTRAL STUDIES OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF MILK

Mikhail V. Belyakov ¹, Igor Yu. Efremenkov ²

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

¹ bmw20100@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² matiusharius@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Abstract. Fractionation of milk is widely used for the production of various products. Visible and near-infrared spectroscopy can be used for qualitative assessment of milk fractions. The aim of the work is to study the fractional composition of milk using optical photoluminescence spectroscopy and determine the most informative spectral ranges and parameters. In this study, milk fractions with higher and lower fat content were obtained by ultrasound separation. The spectral characteristics of whole milk and the resulting fractions were measured in the range of 230–650 nm on a CM2203 diffraction spectrofluorimeter. The excitation spectra of milk and the obtained fractions do not differ significantly from each other and contain four maxima: 290 nm, 324 nm, 360 nm and 445 nm. The differences are manifested in the quantitative ratio of maxima and integral parameters. The integral absorption capacity H , of the lower fraction of milk exceeds the same parameter for the upper one by 31,2 % in the entire spectral range and by 24–44 % in certain ranges of the studied spectrum. The spectral photo-luminescent properties of fractionated milk depend on the fat content. For

© Беляков М. В., Ефременков И. Ю., 2025

the lower fraction, the best photoluminescent properties (spectral characteristics and energy parameters) are caused by a decrease in luminescence quenching due to a change in the concentration of milk fat. Photoluminescence fluxes excited at 290 nm, 360 nm, and 445 nm statistically significantly decrease linearly with increasing fat content in the fraction or milk. The most informative wavelength of milk excitation during fractionation is 360 nm. The results obtained can be used to develop a methodology for fat content control in milk processing by fractionation.

Keywords: *fractionation of milk, fats, luminescence, optical monitoring, photoluminescence flux, asymmetry, kurtosis.*

For citation: Belyakov, M.V. & Efremenkov, I.Yu. (2024). Optical spectral studies of the fractional composition of milk. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 53-58. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.008. EDN: <https://elibrary.ru/DKQECX>.

ВВЕДЕНИЕ

Молоко – это один из самых питательных и полезных продуктов для человека. Оно содержит множество витаминов, минералов, белков и жиров, необходимых для здоровья. Состав молока включает в себя такие полезные компоненты, как кальций, витамин D, белки, жиры и углеводы.

Фракционирование молока – это процесс разделения молока на отдельные компоненты, такие как белки, жиры и углеводы. Этот процесс позволяет получить различные продукты из молока, которые обладают уникальными свойствами и вкусом.

Например, из сыворотки молока можно получить сывороточный протеин, который используется в спортивном питании. Из жиров молока можно получить масло, которое используется в кулинарии и косметике. Из углеводов молока можно получить лактозу, которая используется в пищевой промышленности для придания сладкого вкуса продуктам.

Фракционирование молока имеет большое значение для потребителей, так как позволяет получить продукты, обладающие уникальными свойствами и вкусом. Такие продукты могут быть более полезными и эффективными, чем обычное молоко, и могут быть использованы в различных сферах, начиная от питания и заканчивая косметологией, а производителям данной продукции позволять получать большую прибыль.

Главным направлением производства молочной продукции является внедрение и применение инновационных технических решений, которые обеспечивают конкурентоспособность, а также большую экономическую эффективность [1]. За последнее десятилетие наблюдается рост производства молока на ферме, благодаря модернизации объектов животноводства, добавление новых методов контроля продукции [2]. Такими методами могут являться и оптические. Спектроскопия, благодаря высокой скорости измерений, не требующая дополнительных реактивов, по сравнению с химическими методами, активно применяется для определения различных параметров молока.

Например, проводились исследования по изучению характеристик фракций безводного молочного жира крупного рогатого скота и буйволицы вместе с жиром детских смесей [3]. Спектроскопия используется для быстрой классификации сухого цельного молока и сухого обезжиренного молока [4], также совместно с использованием машинного обучения проводились исследования по прогнозированию содержания жирных кислот в молоке буйволиц [5]. С помощью спектроскопии прогнозируют количественные показатели молока на ос-

нове инфракрасной спектроскопии с использованием методов машинного обучения [6]. Помимо этого, для контроля показателей качества молока оптическими методами проводились исследования для изучения взаимосвязей спектральных картин, параметров поглощения и значений фотолуминесценции коровьего молока в процессе его скисания [7–8]. Также спектроскопия применяется для определения фальсификатов в молочных продуктах, а именно: проводится идентификация фальсификации молока в верблюжьем молоке с помощью Фурье-инфракрасной спектроскопии и моделей машинного обучения [9]. Осуществляется обнаружение и количественное определение кукурузного крахмала и пшеничной муки в качестве примесей в сухом молоке методом ближней и среднеинфракрасной спектроскопии в сочетании с хемометрическими процедурами [10] и распространенных примесей в коровьем молоке наливом с помощью Фурье-преобразованной среднеинфракрасной спектроскопии [11].

Целью работы является исследование фракционного состава молока с помощью оптической фотолуминесцентной спектроскопии. Задачами являются измерение спектров возбуждения и люминесценции с последующим расчетом энергетических и статистических параметров и определение на их основе наиболее информативных спектральных диапазонов и параметров.

МЕТОДЫ

Для получения спектральных картин использовали 10 образцов молока агрофирмы «Мичурино» с массовой долей жира 3,37 %, содержанием белка 3,42 %. Исходные параметры молока измерили с помощью ультразвукового анализатора «Эксперт Профи» («Лабораторика», Россия).

Было проведено одноступенчатое ультразвуковое гравитационное разделение после обработки ультразвуком, аналогичное [12]. Образцы молока в специальной емкости помещали в ультразвуковую ванну KaisiK-103 («Kaisi», Китай) на 3 часа, при частоте ультразвукового воздействия 40 кГц, периодом колебаний $T = 25$ мкс, длиной звуковой волны $\lambda = 3,75$ см, при этом меняя воду каждые 15–20 мин, чтобы на поверхности исследуемого молока не образовывалась белковая пленка.

Под воздействием звуковых волн в ванне возникала кавитация, и непосредственно шло разделение молока на две фракции: верхнюю (с более высоким содержанием жиров) и нижнюю (с низким содержанием жиров). В отличие от традиционных сепараторов, которые используют механическое воздействие, ультразвуковое сепариро-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

вание минимизирует повреждение молочных компонентов, что позволяет эффективнее разделять молоко на фракции. Также ультразвуковые сепараторы могут быть легко настроены путем регулирования частоты ультразвука для работы с различными типами молока и для достижения желаемых характеристик конечного продукта. После обработки ультразвуком выполнялось бережное извлечение пробы каждой фракции с помощью проботборной пипетки (ISO 8655/DIN12650).

Спектральные характеристики были получены на спектрофлуориметре CM2203, аналогично ранее апробированной методике [7]. Измерения спектров возбуждения проводили в диапазонах 230–600 нм, после чего получали спектры люминесценции на длинах волн 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм. Спектральные картины необходимы для дальнейшего создания оптического метода детектирования фракционного молока.

Расчет интегральных параметров спектров возбуждения и люминесценции осуществляли с помощью формул:

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\eta_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения (поглощения); $\varphi_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции; $\lambda_1 \dots \lambda_2$ – границы спектрального диапазона возбуждения, люминесценции.

Для статистического анализа использовали следующие формулы:

$$M_{\lambda} = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} \lambda \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где M_{λ} – математическое ожидание, $\varphi(\lambda)$ – дифференциальная функция распределения (распреде-

ление плотности вероятности); λ – длина волны; $\lambda_{\min.}$, $\lambda_{\max.}$ – минимальное и максимальное значение длин волн.

Дисперсия σ^2 , характеризующая степень разброса длин волн люминесценции относительно центра тяжести, которая рассчитывается по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^2 \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где σ^2 – дисперсия.

На практике для оценки асимметрии используют коэффициент асимметрии As , который определяется по формуле:

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (5)$$

где μ_3 – центральный статический момент 3-го порядка, который рассчитывается по формуле:

$$\mu_3 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Для сравнения спектра с нормальным распределением вычислили эксцесс Ex по формуле:

$$Ex = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (7)$$

где μ_4 – центральный статический момент 4-го порядка, который служит числовой характеристикой «островершинности» или пологости («плосковершинности») спектра и рассчитывается по формуле:

$$\mu_4 = \int_{\lambda_{\min.}}^{\lambda_{\max.}} (\lambda - M)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

После фракционирования на анализаторе «Эксперт Профи» были измерены параметры фракций и исходного молока (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры молока и его фракций

Table 1 – Parameters of milk and its fractions

Фракция	Жир, %	СОМО, %	pH	Белок, %	Лактоза, %
Нижняя	1,28± 0,05	9,53± 0,1	6,35± 0,2	3,50± 0,05	5,23± 0,02
Верхняя	3,17± 0,04	9,51± 0,2	6,28± 0,1	3,49± 0,04	5,22± 0,03
Цельное молоко	3,37± 0,05	9,33± 0,1	6,32± 0,1	3,42± 0,05	5,13± 0,02

Таким образом, ультразвук способствовал образованию градиента увеличения концентрации жира по вертикали по высоте разделительной емкости. Остальные параметры молока изменились незначительно.

Спектральные характеристики молочных фракций и цельного молока, измеренные при синхронном сканировании (спектры возбуждения $\eta(\lambda)$), представлены на рисунке 1.

Спектры возбуждения обеих полученных фракций качественно не отличаются между собой и содержат все четыре максимума: 290 нм, 324 нм, 360 нм и 445 нм, ранее полученные для цельного молока [8].

Отличия проявляются в количественном соотношении максимумов и интегральных параметров H , о.е.

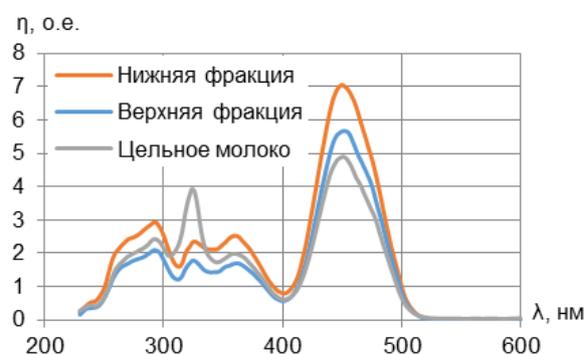


Рисунок 1 – Спектры возбуждения молока и его фракций

Figure 1 – Excitation spectra of milk and its fractions

Например, для цельного молока значения спектральной поглощательной способности η , о.е. для максимумов 290 нм и 360 нм находятся посередине от максимумов фракций, в то время как η_{324} , о.е. расположен практически в два раза выше,

а η_{445} , о.е.– наоборот, ниже максимумов обеих фракций. Интегральные параметры спектров возбуждения молока, рассчитанные по формуле (1) в соответствующих основным максимумам спектральных диапазонов, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные параметры спектров возбуждения молока Н, о. е.

Table 2 – Integral parameters of the excitation spectra of milk

Фракция	Для спектрального диапазона, нм				
	230–310	310–340	340–400	400–520	230–600
Нижняя	150±2	62±1	114±1	414±1	743±6
Верхняя	106±8	46±2	79±3	333±5	566±19
Цельное молоко	121±6	85±5	90±4	282±7	581±22

Интегральная поглощательная способность Н, о.е. нижней фракции молока превышает аналогичный параметр для верхней на 31,2 % во всем спектральном диапазоне и на 24–44 % – в отдельных диапазонах исследуемого спектра. Относительная погрешность определения интегральной поглощательной способности для цельного молока и его верхней фракции достигает 7,5 %, а для нижней фракции – не более 1,6 %.

Спектры фотолюминесценции молока и его фракций для определенных выше длин волн возбуждения представлены на рисунках 2–5.

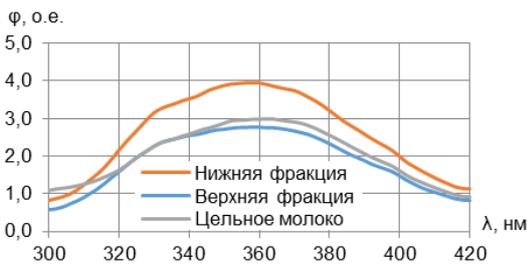


Рисунок 2 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_e = 290$ нм

Figure 2 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_e = 290$ nm

При возбуждении излучением с длиной волны 290 нм все спектры фотолюминесценции имеют единственный максимум на длине волны примерно 355–360 нм (рис. 2). Спектр нижней фракции расположен заметно выше, а спектры цельного молока и его верхней фракции практически совпадают.

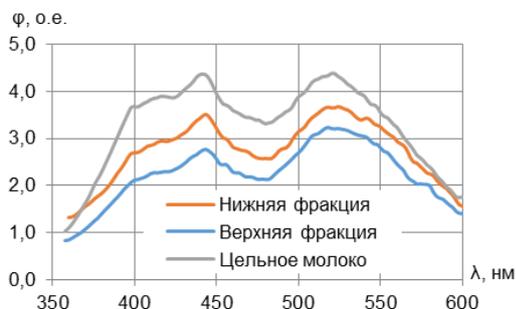


Рисунок 3 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_e = 324$ нм

Figure 3 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_e = 324$ nm

Спектры качественно схожи и имеют по два максимума примерно на 443 нм и 520 нм. Как можно было прогнозировать по рис. 1 и табл. 2,

наибольшая люминесценция у цельного молока, затем следуют нижняя и верхняя фракции.

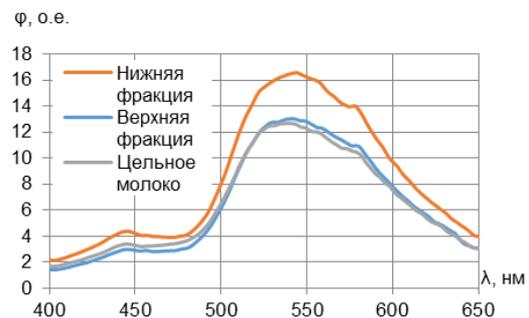


Рисунок 4 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_e = 360$ нм

Figure 4 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_e = 360$ nm

Основной максимум фотолюминесценции при возбуждении $\lambda_e = 360$ нм расположен на 545 нм, а существенно меньший побочный – на 445 нм. Как и для возбуждения 290 нм, наибольшая люминесценция у нижней фракции, а для цельного молока и его верхней фракции кривые $\phi(\lambda)$ практически совпадают.

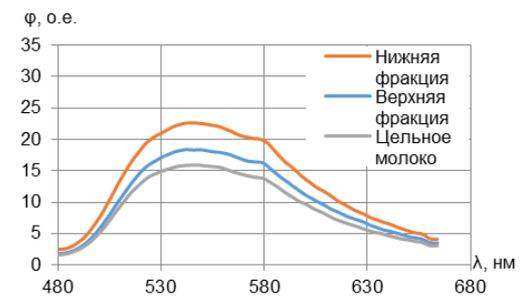


Рисунок 5 – Спектры люминесценции молока и его фракций при $\lambda_e = 445$ нм

Figure 5 – Luminescence spectra of milk and its fractions at $\lambda_e = 445$ nm

При возбуждении излучением длиной волны 445 нм спектр фотолюминесценции молока с наибольшей жирностью (3,37 %) расположен наиболее низко в отличие от фракций с меньшей жирностью (табл. 1).

Интегральные и статистические параметры спектров люминесценции фракций молока, рассчитанные по формулам (2)–(8), представлены в таблице 3. Погрешность определения потоков фотолюминесценции Φ_λ , о.е. цельного молока, как правило, больше, чем для фракций, особенно нижней.

Таблица 3 – Интегральные и статистические параметры спектров люминесценции молока
Table 3 – Integral parameters of the excitation spectra of milk

	λ_b , нм	Параметры			
		$\Phi_{\lambda_{ср}}$, о.е.	M_{λ} , нм	As	Ex
Нижняя фракция	290	317 ± 2	360,0 ± 0,2	0,040 ± 0,003	-0,770 ± 0,002
	324	677 ± 5	481,0 ± 0,1	-0,100 ± 0,009	-1,070 ± 0,005
	360	2112 ± 7	543,0 ± 0,2	-0,400 ± 0,012	-0,220 ± 0,001
	445	2478 ± 2	565,0 ± 0,1	0,330 ± 0,007	-0,590 ± 0,003
Верхняя фракция	290	230 ± 17	359,0 ± 0,1	0,150 ± 0,004	-0,800 ± 0,005
	324	557 ± 17	484,0 ± 0,2	-0,130 ± 0,008	-1,040 ± 0,007
	360	1646 ± 31	545,0 ± 0,1	-0,410 ± 0,013	-0,140 ± 0,001
	445	2005 ± 25	565,0 ± 0,1	0,380 ± 0,009	-0,570 ± 0,002
Цельное молоко	290	249 ± 11	359,0 ± 0,1	0,040 ± 0,002	-0,810 ± 0,009
	324	804 ± 56	479,0 ± 0,1	0,060 ± 0,009	-1,080 ± 0,007
	360	1644 ± 54	536,0 ± 0,2	-0,130 ± 0,010	-0,300 ± 0,004
	445	1730 ± 43	565,0 ± 0,2	0,360 ± 0,008	-0,580 ± 0,003

ОБСУЖДЕНИЕ

В целом, результаты подтверждают первоначальную гипотезу, согласно которой спектральные фотолюминесцентные свойства фракционированного молока зависят от содержания жира и размера глобул. Предположительно, для нижней фракции лучшие фотолюминесцентные свойства (спектральные характеристики и энергетические параметры) вызваны уменьшением тушения люминесценции за счёт изменения концентрации молочного жира.

Отсутствие существенных качественных изменений спектров возбуждения и люминесценции показывает, что физический сдвиг при применении ультразвука не нарушает физическую целостность шариков молочного жира [13]. Мембрана глобул молочного жира не подвергается значительным повреждениям и не покрывается мицеллярными структурами казеина [14].

Ограничения при фракционировании с использованием натуральных сливок, описанные в [15], также присутствуют при ультразвуковом разделении. Например, более мелкие жировые шарики, которые уже находятся в верхней части емкости, с трудом опускаются обратно на дно емкости и остаются там, возможно, разбавляя образовавшийся слой.

Тем не менее, технология ультразвукового фракционирования обеспечивает усовершенствование простых методов фракционирования, ранее применявшихся с использованием только естественного разделения.

Потоки фотолюминесценции при возбуждении 290 нм уменьшаются при увеличении содержания жира в фракции или молоке. При этом коэффициент детерминации зависимости $\Phi_{290}(C_{\text{жира}})$ равен 0,91. Аналогично для потоков Φ_{360} и Φ_{445} , где коэффициенты детерминации составляют 0,99 и 0,92 соответственно.

Математические ожидания спектров для обеих фракций и молока меняются незначительно. Асимметрия, в основном, меняется либо незначительно (для $\lambda_b = 445$ нм), либо бессистемно с изменением знака от левосторонней к правосторонней симметрии (для $\lambda_b = 290$ нм и $\lambda_b = 324$ нм). Для $\lambda_b = 360$ нм асимметрия обеих фракций увеличивается примерно в 3,1 раза по сравнению с цельным молоком. Эксцесс практически не меняется за

исключением $\lambda_b = 360$ нм, где его уменьшение достигает 1,7–2,8 раз у фракций по сравнению с цельным молоком.

Ограничением настоящего исследования является использование только двух фракций, полученных при ультразвуковом разделении.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики контроля жирности при переработке молока путем фракционирования. Поэтому в ходе дальнейших исследований и установленных длин волн возбуждения и информативных спектральных диапазонов регистрации люминесценции необходимо провести эксперименты с большим числом фракций различной жирности для последующего построения математических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее информативной длиной волны возбуждения молока при фракционировании является 360 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в спектральном диапазоне 400–650 нм.

При этом поток фотолюминесценции Φ_{360} наиболее коррелируется с содержанием жира, а асимметрия As и эксцесс Ex различаются для цельного молока и его фракций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров И.А. Комплексный подход в применении инновационных технологий производства молока // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 17–21. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-17.
2. Скоржин В.К., Гаджиев А.М. Модернизация технологических процессов молочного скотоводства // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1(41). С. 12–16. DOI: 10.51794/27132064-2021-1-12.
3. Abdelmoneim H., Wei A., Xingguo W. Characterisation of bovine and buffalo anhydrous milk fat fractions along with infant formulas fat: Application of differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, and colour attributes 2020 // Food Science and Technology. 2020. № 129. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109542.
4. Rapid classification of whole milk powder and skimmed milk powder by laser-induced breakdown spectroscopy combined with feature processing method and logistic regression / Yu. Ding [et al.] // Analytical sciences. 2024. № 3. P. 399–411. DOI: 10.1007/s44211-023-00467-6.

5. Integrating Mid-Infrared Spectroscopy, Machine Learning, and Graphical Bias Correction for Fatty Acid Prediction in water Buffalo Milk / Y. Zhiqiu [et al.] // Science of Food and Agriculture. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13471>.

6. Прогнозирование количественных характеристик молока на основе инфракрасной спектроскопии с применением методов машинного обучения / Л.В. Легашев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2022. № 3. С. 47–56. DOI: [10.14529/ctcr220305](https://doi.org/10.14529/ctcr220305).

7. Photoluminescence Spectral Patterns and Parameters of Milk While Souring / M.V. Belyakov [et al.] // Agriculture. 2023. № 5. P. 1054. DOI: [10.3390/agriculture13051054](https://doi.org/10.3390/agriculture13051054).

8. Изменение спектральных фотолуминесцентных свойств молока при скисании / М.В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. № 3. С. 460–475. DOI: [10.15507/2658-4123.032.202203.460-475](https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475).

9. Identification of Milk Adulteration in Camel Milk Using FT-Mid-Infrared Spectroscopy and Machine Learning Models / Zh. Yao, X. [et al.] // Foods. 2023. № 24. P. 4517. DOI: [10.3390/foods12244517](https://doi.org/10.3390/foods12244517).

10. Detection and quantification of corn starch and wheat flour as adulterants in milk powder by near- and mid-infrared spectroscopy coupled with chemometric routines / E.R. Caballero-Agosto [et al.] // Food Chemistry Advances. 2024. DOI: [10.1016/j.focha.2023.100582](https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100582).

11. Detection of common adulterants in bulk bovine milk using fourier transformed mid-infrared spectroscopy / A. Guerra [et al.] // Acta IMEKO. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v13i1.1648>.

12. Ultrasonically enhanced fractionation of milk fat in a litre-scale prototype vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. № 28, P. 118–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.023>.

13. Design parameters for the separation of fat from natural whole milk in an ultrasonic litre-scale vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21(4). P. 1289–1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.007>.

14. Apparent ζ -potential as a tool to assess mechanical damages to the milk fat globule membrane / M.C. Michalski [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2002. Vol. 23(1). P. 23–30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00203-X).

15. Microfiltration of Raw Whole Milk to Select Fractions with Different Fat Globule Size Distributions: Process Optimization and Analysis / M.C. Michalski [et al.] // Journal of Dairy Science. 2006. Vol. 89(10). P. 3778–3790. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72419-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72419-5).

Информация об авторах

М. В. Беляков – доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

И. Ю. Ефременков – магистр, младший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

REFERENCES

1. Tikhomirov, I.A. An integrated approach in the application of innovative milk production technologies // Equipment and technologies in animal husbandry. 2021. № 1(41). P. 17-21. DOI: [10.51794/27132064-2021-1-17](https://doi.org/10.51794/27132064-2021-1-17).

2. Skorkin, V.K., Gadzhiev, A.M. Modernization of technological processes of dairy farming // Machinery and technologies in animal husbandry. 2021. № 1(41). P. 12-16. DOI: [10.51794/27132064-2021-1-12](https://doi.org/10.51794/27132064-2021-1-12).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 30 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.

3. Abdelmoneim, H., Wei, A., Xingguo, W. Characterisation of bovine and buffalo anhydrous milk fat fractions along with infant formulas fat: Application of differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, and colour attributes 2020 // Food Science and Technology. 2020. № 129. DOI: [10.1016/j.lwt.2020.109542](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109542).

4. Rapid classification of whole milk powder and skimmed milk powder by laser-induced breakdown spectroscopy combined with feature processing method and logistic regression / Yu. Ding [et al.]. // Analytical sciences. 2024. № 3. P. 399-411. DOI: [10.1007/s44211-023-00467-6](https://doi.org/10.1007/s44211-023-00467-6).

5. Integrating Mid-Infrared Spectroscopy, Machine Learning, and Graphical Bias Correction for Fatty Acid Prediction in water Buffalo Milk / Y. Zhiqiu [et al.] // Science of Food and Agriculture. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13471>.

6. Forecasting quantitative characteristics of milk based on infrared spectroscopy using machine learning methods / L.V. Legashev [et al.] // Bulletin of the South Ural State University. 2022. № 3. P. 47-56. DOI: [10.14529/ctcr220305](https://doi.org/10.14529/ctcr220305).

7. Photoluminescence Spectral Patterns and Parameters of Milk While Souring / M.V. Belyakov [et al.] // Agriculture. 2023. № 5. P. 1054. DOI: [10.3390/agriculture13051054](https://doi.org/10.3390/agriculture13051054).

8. Change of spectral photoluminescent properties of milk during souring / M.V. Belyakov [et al.] // Engineering technologies and systems. 2022. No. 3. P. 460-475. DOI: [10.15507/2658-4123.032.202203.460-475](https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475).

9. Identification of Milk Adulteration in Camel Milk Using FT-Mid-Infrared Spectroscopy and Machine Learning Models / Zh. Yao, X. [et al.] // Foods. 2023. № 24. P. 4517. DOI: [10.3390/foods12244517](https://doi.org/10.3390/foods12244517).

10. Detection and quantification of corn starch and wheat flour as adulterants in milk powder by near- and mid-infrared spectroscopy coupled with chemometric routines / E.R. Caballero-Agosto [et al.] // Food Chemistry Advances. 2024. DOI: [10.1016/j.focha.2023.100582](https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100582).

11. Detection of common adulterants in bulk bovine milk using fourier transformed mid-infrared spectroscopy / A. Guerra [et al.] // Acta IMEKO. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v13i1.1648>.

12. Ultrasonically enhanced fractionation of milk fat in a litre-scale prototype vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. № 28, P. 118-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.023>.

13. Design parameters for the separation of fat from natural whole milk in an ultrasonic litre-scale vessel / T. Leong [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21(4). P. 1289-1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.007>.

14. Apparent ζ -potential as a tool to assess mechanical damages to the milk fat globule membrane / M.C. Michalski [et al.] // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2002. Vol. 23(1). P. 23-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00203-X).

15. Microfiltration of Raw Whole Milk to Select Fractions with Different Fat Globule Size Distributions: Process Optimization and Analysis / M.C. Michalski [et al.] // Journal of Dairy Science. 2006. Vol. 89(10). P. 3778-3790. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72419-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72419-5).

Information about the authors

M.V. Belyakov - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center of VIM.

I.Yu. Efremenkova - Master's degree, Junior Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center of VIM.