

Сравнительный анализ скисания молока методами отражательной инфракрасной спектроскопии

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация

М. В. Беляков

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Михаил Владимирович Беляков
E-mail: bmw20100@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Беляков, М. В. (2024). Сравнительный анализ скисания молока методами отражательной инфракрасной спектроскопии. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(3), 82-91.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.554>

ПОСТУПИЛА: 03.03.2024
ДОРАБОТАНА: 12.08.2024
ПРИНЯТА: 15.09.2024
ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Для повышения эффективности и конкурентоспособности молочнохозяйственной отрасли важным является контроль качества молочной продукции. Инфракрасная спектроскопия демонстрирует значительный потенциал для ее применения при измерении состава, обнаружении фальсификаций, контроля при технологических процессах. Вместе с тем, отсутствуют сведения о применении ИК-методов для анализа скисания молока при хранении и переработке.

Цель: изучение оптических свойств в инфракрасном спектре молока при скисании для обоснования выбора спектрального диапазона и наиболее информативных параметров контроля в процессе хранения и переработки.

Материалы и методы: Для спектральных измерений использовалось питьевое пастеризованное молоко с массовой долей жира 4,01%, белка 3,37%, лактозы 4,94%. Производили измерения спектральных характеристик отражения и поглощения $\alpha(\lambda)$ в диапазонах 400–2500 нм и 2,5–18,0 мкм по общепринятой методике.

Результаты: В ближней ИК-области имеются максимумы поглощения на длинах волн примерно 980 нм, 1200 нм, 1455 нм, 1930 нм. Интегральные коэффициенты поглощения, рассчитанные как во всем спектре, так и в областях максимумов незначительно (менее 10%) и несистемно меняются при увеличении кислотности в 6 раз в процессе скисания. Статистические параметры также меняются незначительно и несистемно. Все спектральные кривые имеют выраженную левостороннюю асимметрию и умеренную плосковершинность. В спектре средневолнового поглощения имеется единственный максимум примерно на 9400 нм в области 8000–12500 нм. Зависимость коэффициента поглощения от кислотности в области 8000–12500 нм являются возрастающей и может быть статистически достоверно аппроксимирована. Статистические параметры при изменении кислотности в среднем ИК диапазоне меняются несистемно. Все спектры имеют правостороннюю асимметрию и выраженную плосковершинность.

Выводы: Контроль кислотности молока в процессе хранения и переработки при скисании наиболее целесообразно осуществлять по поглощению в среднем ИК диапазоне, причем наиболее информативная область спектра 8–12,5 мкм. Статистические параметры спектров поглощения молока как в ближнем, так и в среднем инфракрасном диапазоне меняются несистемно и, зачастую, незначительно. Все спектры являются плосковершинными, в ближнем ИК диапазоне они имеют левостороннюю, а в средней ИК области – правостороннюю асимметрию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

молоко; кислотность; спектр отражения молока; спектр поглощения молока; ближний инфракрасный диапазон; средний инфракрасный диапазон

Wave and Field Influences in Food Technologies: A Scoping Review

Federal Scientific Agroengineering
Center VIM, Moscow, Russian Federation

Mikhail V. Belyakov

CORRESPONDENCE:

Mikhail V. Belyakov

E-mail: bmw20100@mail.ru

FOR CITATIONS:

Belyakov, M. V. (2024). Comparative Analysis of milk souring by reflective infrared spectroscopy. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(3), 82-91. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.3.554>

RECEIVED: 03.03.2024

REVISED: 12.08.2024

ACCEPTED: 15.09.2024

PUBLISHED: 30.09.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: To improve the efficiency and competitiveness of the dairy industry, it is important to control the quality of dairy products. Infrared (IR) spectroscopy demonstrates significant potential for its application in composition measurement, detection of falsifications, and control in technological processes. At the same time, there is no information on the use of IR methods for the analysis of milk souring during storage and processing.

Purpose: To study optical properties in the infrared spectrum of milk during souring to justify the choice of the spectral range and the most informative control parameters during storage and processing.

Materials and Methods: For measurements, drinking pasteurized milk with a mass fraction of 4.01 % fat, 3.37 % protein, and 4.94 % lactose was taken. The spectral characteristics of reflectance and absorption $\alpha(\lambda)$ were measured in the ranges of 400–2500 nm and 2.5–18.0 microns according to the generally accepted method.

Results: In the near-infrared region, there are absorption maxima at wavelengths of approximately 980 nm, 1200 nm, 1455 nm, and 1930 nm. The integral absorption coefficients calculated both in the entire spectrum and in the maximum regions vary slightly (less than 10 %) and non-systematically with an increase in acidity by 6 times during the souring process. Statistical parameters also change slightly and non-systematically. All spectral curves have pronounced left-sided asymmetry and moderate flatness. In the medium-wave absorption spectrum, there is a single maximum at about 9400 nm in the 8000–12500 nm region. The dependence of the absorption coefficient on acidity in the range of 8000–12500 nm is increasing and can be approximated with statistical validity. Statistical parameters do not change systematically with changes in acidity in the mid-IR range. All spectra have right-sided asymmetry and pronounced flatness.

Conclusion: It is most advisable to control the acidity of milk during storage and processing at souring by absorption in the middle IR range, the most informative spectral region being 8–12.5 microns. The statistical parameters of the absorption spectra of milk in both the near and middle infrared ranges vary non-systematically and, often, insignificantly. All spectra are flat-topped, in the near-IR range they have left-sided, and in the middle IR region they have right-sided asymmetry.

KEYWORDS

milk; acidity; milk reflectance spectrum; milk absorption spectrum; near infrared range; mid infrared range

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением повышения эффективности и конкурентоспособности молочной хозяйственной отрасли является проведение модернизации молочных ферм — технологическое перевооружение с использованием инновационных технологий и технических средств, обеспечение экологической безопасности и безопасных условий труда (Иванов, 2022). Важным здесь является контроль качества молочной продукции. Среди современных методов контроля распространены химические (Топникова и соавт., 2023), высокоэффективная жидкостная хроматография (Святкина & Андрухова, 2009), масс-спектрометрия (Хуршудян и соавт., 2020), капиллярный электрофорез (Мельденберг и соавт., 2020).

Среди оптико-физических методов выделяются колориметрия (Buzdar et al., 2023), флуоресцентная и инфракрасная (ИК) спектроскопия. Метод флуоресцентной спектроскопии применяется для получения информации о свойствах и качестве термически обработанного молока посредством одновременного определения содержания фуруозина и лактулозы (Кулмырзаев & Мачихин, 2007). Метод, основанный на волоконно-оптической регистрации спектров флуоресценции при лазерном ультрафиолетовом возбуждении разработан для анализа молока и пахты с различной долей жира (Лукашенко, 2014). Также метод флуоресцентной диагностики применялся для оценки кислотности молока (Беляков и соавт., 2023) и наличия антибиотиков (Самарин и др., 2024). Метод также может быть использован для диагностики молочных продуктов: творога, сметаны, масла (Беляков & Никитин, 2023).

Спектроскопия среднего ИК-диапазона используется для прогнозирования содержания кальция и фосфора, титруемой кислотности молока (Toffanin et al., 2015). С помощью ИК-спектроскопии оценивали импульсную электронно-пучковую и термическую обработку молока и молочной сыворотки (Хамнаева и соавт., 2009). ИК-анализ может быть использован для прогнозирования стабильности систем концентрированного молока при последующей переработке (Markoska et al., 2019). Инфракрасные анализаторы молока применяются для получения концентраций азота мочевины в молоке (Portnoy et al., 2021).

Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона используется для прогнозирования содержания белка в молоке (Wang et al., 2019). Из-за изменений в структуре белка и взаимодействия во время обработки и хранения ультрапастеризованного молока изменения ИК-спектров хорошо коррелируют с образованием осадка (нестабильностью при хранении) во время хранения (Grewal et al., 2018). Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье применялась для идентификации β -казеина в молоке (Daniloski et al., 2022). Currò et al. (2017) оценили возможности использования спектроскопии пропускания в ближнем инфракрасном диапазоне для прогнозирования зрелости сыра.

Инфракрасная спектроскопия демонстрирует значительный потенциал для обнаружения фальсификации в пищевых добавках и высокую точность для одновременного прогнозирования содержания белка и массы добавленных белкового концентрата и молочной сыворотки (Andrade et al., 2019). Исследованы возможности для быстрого обнаружения фальсификации молочного жира в йогуртах (Temizkan et al., 2020), для определения фальсификации сыров с более высоким содержанием добавок, чем разрешенные (целлюлоза и диоксид кремния), и неаутентичных веществ, используемых для увеличения веса и объема, таких как пшеничная мука, манная крупа и опилки (Visconti et al., 2020). Вместе с тем, не изучено влияние скисания молока на его оптические свойства в инфракрасном диапазоне и открывающиеся в связи с этим возможности экспрессного неразрушающего контроля качества молока при его хранении и переработке.

Целью данного исследования является изучение оптических свойств в инфракрасном спектре молока при скисании для обоснования выбора спектрального диапазона и наиболее информативных параметров контроля в процессе хранения и переработки. Задачами являются измерение спектральных характеристик отражения и поглощения для определения рабочих диапазонов спектров. Рассчитаны интегральные и статистические параметры спектров для сравнительной оценки в ближней и средней инфракрасной области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Для спектральных измерений использовалось питьевое пастеризованное молоко производителя «Мичурино» (Тамбовская область) с массовой долей жира 4,01 %, белка 3,37 %, лактозы 4,94 %. В процессе трехдневного скисания молоко хранилось в темном помещении при комнатной температуре 20°C.

Оборудование

Измерения спектров отражения в ближнем инфракрасном диапазоне проводили на приборе Foss NIRS 2500 (Foss, Дания). Внешний вид представлен на Рисунок 1.

Прибор позволяет выполнять спектральные измерения в диапазоне 400–2500 нм, спектральное разрешение 0,5 нм.

Измерения спектров поглощения в среднем инфракрасном диапазоне проводили с использованием

Рисунок 1

Внешний вид прибора Foss NIRS 2500

Figure 1

External View of the Foss NIRS 2500 device



Рисунок 2

Внешний вид Фурье-спектрометра ФТ-801

Figure 2

External View of the FT-801 Fourier Spectrometer



Фурье-спектрометра ФТ-801 (Симекс, Россия) с микроскопом МИКРАН-3 (Рисунок 2).

Спектральный диапазон прибора 470–5700 см⁻¹ (1,75–21,3 мкм), разрешение 2 см⁻¹.

Повторность измерений — десятикратная. Первичная обработка спектров производилась в фирменном программном обеспечении компании Симекс ZaIR 3.5.

Инструменты

Все спектры были скорректированы на инструментальные искажения с помощью встроенных программных пакетов. В них же на основе спектров отражения получены спектры поглощения. Математическая обработка велась в Microsoft Excel, Origin 8 Pro с применением алгоритма Савицкого-Голея.

Методы

Кислотность молока контролировали титриметрическим методом.

Производили измерения спектральных характеристик отражения и поглощения $\alpha(\lambda)$ в диапазонах 400–2500 нм и 2,5–18,0 мкм по общепринятой

методике: из широкоспектрального источника излучения с помощью монохроматора выделялся узкий спектральный диапазон излучения и оно направлялось на исследуемое молоко, затем приемником излучения регистрировался световой поток отраженного излучения и вычислялась доля поглощенного излучения. Измерения проводились во всех вышеуказанных спектральных диапазонах ближней и средней инфракрасной области.

Анализ данных

Были рассчитаны интегральные коэффициенты поглощения в спектральных областях λ_1 – λ_2 :

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

$\alpha(\lambda)$ — спектральная характеристика поглощения, λ_1, λ_2 — границы спектральной области.

Относительные погрешности ε определения коэффициента поглощения при многократных из-

мерениях ($n = 10$) вычисляли по общепринятым формулам.

Для анализа использовали следующие, хорошо известные из математической статистики числовые параметры: математическое ожидание $M\lambda$, характеризующее положение «центра тяжести» спектра; дисперсия σ^2 , характеризующая степень разбросанности относительно «центра тяжести»; асимметрия спектра As ; эксцесс Ex , дающий представление о степени острровершинности или плосковершинности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

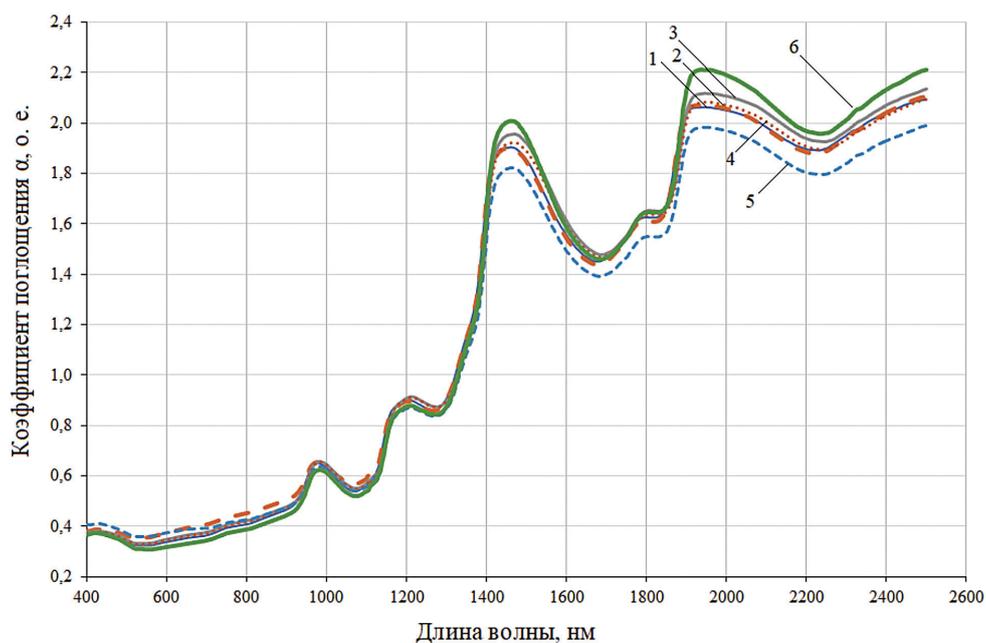
Полученные спектральные характеристики позволили выявить наиболее информативные спектральные диапазоны, где наиболее заметна временная динамика изменения оптических свойств молока в процессе его скисания. Спектры ближнего инфракрасного поглощения молока в процессе скисания представлены на Рисунке 3.

Рисунок 3

Спектры ближнего инфракрасного поглощения молока при скисании

Figure 3

Near-Infrared Absorption Spectra of Milk During Souring



Примечание. 1 — 0 часов, 2 — 5 часов, 3 — 23 часа, 4 — 30 часов, 5 — 46 часов, 6 — 52 часа после начала скисания

Note. 1 — 0 hours, 2 — 5 hours, 3 — 23 hours, 4 — 30 hours, 5 — 46 hours, 6 — 52 hours after the start of souring.

Рассчитанные интегральные и статистические параметры молока в ближнем ИК-диапазоне в различных спектральных областях λ_1 - λ_2 представлены в Таблицах 1 и 2.

Спектры среднего инфракрасного поглощения молока в процессе скисания представлены на Рисунке 4.

Таблица 1

Интегральные параметры молока для спектральных областей ближнего инфракрасного диапазона

Table 1

Integral Parameters of Milk for the Spectral Regions of the Near-Infrared Range

Время скисания t , часов	Кислотность K , °Т	α , о. е., для диапазона, нм				
		900–1100	1125–1275	1360–1690	1840–2230	400–2500
0	17	113	127	547	769	2620
5	18	117	127	544	768	2634
23	23	114	127	558	783	2659
30	69	114	127	551	770	2624
46	99	112	122	520	732	2518
52	103	108	123	560	806	2671

Таблица 2

Статистические параметры молока в ближнем инфракрасном диапазоне

Table 2

Statistical Parameters of Milk in the Near-Infrared Range

Время скисания t , часов	Кислотность K , °Т	M	σ^2	A_s	E_x
0	17	1760	$2,54 \cdot 10^5$	-0,615	-0,318
5	18	1752	$2,61 \cdot 10^5$	-0,607	-0,363
23	23	1761	$2,54 \cdot 10^5$	-0,623	-0,307
30	69	1759	$2,54 \cdot 10^5$	-0,617	-0,313
46	99	1748	$2,64 \cdot 10^5$	-0,613	-0,351
52	103	1775	$2,48 \cdot 10^5$	-0,651	-0,235

Таблица 3

Интегральные и статистические параметры молока в среднем инфракрасном диапазоне

Table 3

Integral and Statistical Parameters of Milk in the Mid-Infrared Range

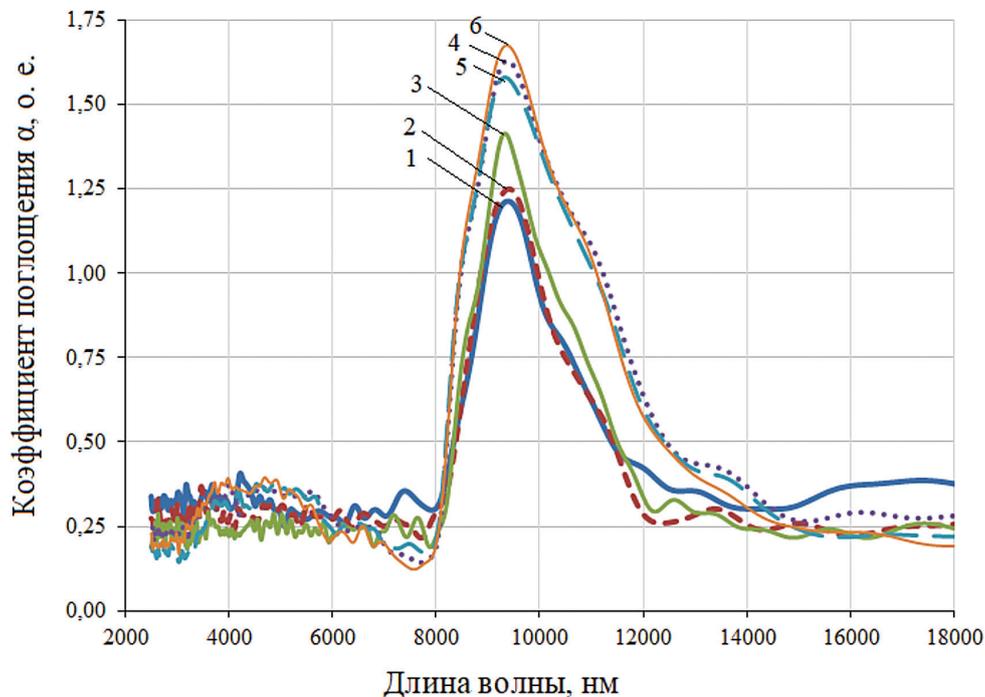
Время скисания t , часов	Кислотность K , °Т	α , о. е.	M	σ^2	A_s	E_x
0	17	3233	10,0	$1,23 \cdot 10^6$	0,384	-0,739
5	18	3190	9,9	$1,12 \cdot 10^6$	0,422	-0,640
23	23	3521	10,0	$1,11 \cdot 10^6$	0,409	-0,638
30	69	4826	10,1	$1,23 \cdot 10^6$	0,268	-0,581
46	99	4833	10,1	$1,24 \cdot 10^6$	0,292	-0,873
52	103	4853	10,0	$1,20 \cdot 10^6$	0,323	-0,806

Рисунок 4

Спектры среднего инфракрасного поглощения молока при скисании

Figure 4

Mid-Infrared Absorption Spectra of Milk during Souring



Примечание: 1 – 0 часов, 2 – 5 часов, 3 – 23 часа, 4 – 30 часов, 5 – 46 часов, 6 – 52 часа после начала скисания.

Note: 1 – 0 hours, 2 – 5 hours, 3 – 23 hours, 4 – 30 hours, 5 – 46 hours, 6 – 52 hours after the start of souring.

Рассчитанные интегральные и статистические параметры молока в среднем ИК-диапазоне в спектральной области 8–12,5 мкм представлены в Таблице 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ближней ИК-области (Рисунок 3) вполне ожидаемо отмечены максимумы поглощения на длинах волн примерно 980 нм, 1200 нм, 1455 нм, 1930 нм. Полосы поглощения в ближней ИК-области широкие и перекрываются, что подтверждается более ранним исследованием сухого обезжиренного молока концентрата молочного белка и сывороточного белка (Pu et al., 2020). Полосы поглощения воды, обусловленные колебанием связей О–Н, находятся в области 1440–1470 нм и 1920–1940 нм (Manley, 2014). Полоса поглощения белка около 2172 нм может быть связана с комбинацией растяжения С–О,

изгиба NH и растяжения С–N (Manley, 2014). Полоса поглощения при 2274 нм, возможно, связана с колебанием С–Н и О–Н лактозы (Holroyd, 2013).

Сплошная составляющая характеристики отражения $\alpha(\lambda)$ увеличивается с увеличением длины волны. Впервые установлено, что наибольшее различие при скисании имеется на длинноволновых пиках 1455 нм и 1930 нм. Интегральные коэффициенты поглощения, рассчитанные как во всем спектре, так и в областях максимумов незначительно (менее 10%) и несистемно меняются при увеличении кислотности в 6 раз в процессе скисания (Таблица 1). Статистические параметры также меняются незначительно (до 7,2%, кроме эксцесса) и несистемно (Таблица 2). Все спектральные кривые имеют выраженную левостороннюю асимметрию ($As < 0$) и умеренную плосковершинность ($Ex < 0$). Ранее статистические параметры спектров молока не анализировались.

В спектре средневолнового поглощения (Рисунок 4) имеется единственный максимум примерно на 9400 нм в области 8000–12500 нм. Область 2200–8000 нм имеет сильные шумы. Зависимость $\alpha(K)$ в области 8000–12500 нм являются возрастающей и при линейной аппроксимации имеет коэффициент детерминации $R^2=0,83$. Вместе с тем, если использовать существенно более сложную аппроксимацию функцией Больцмана, то можно получить коэффициент детерминации 0,999. Статистические параметры (Таблица 3) при изменении кислотности, как и в ближнем ИК диапазоне меняются несистемно. Все спектры имеют правостороннюю асимметрию и выраженную плосковершинность.

Таким образом, общий вид спектров поглощения в инфракрасной области соответствует ранее полученным другими исследователями (Pu et al., 2020), но впервые установленная динамика их изменения при увеличении кислотности позволяет сделать вывод, что наиболее сильно свойства поглощения меняются в спектральном диапазоне 8000–12500 нм. При увеличении кислотности в основном меняются энергетические свойства поглощения, но не качественные параметры спектров. Эти количественные изменения можно объяснить зависимостью интенсивности фотосигнала от изменения концентрации отдельных веществ. Также наибольшая чувствительность поглотительной способности молока проявляется через 23–30 часов после начала скисания.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Беляков, М. В., & Никитин Е.А. (2023). Спектральные люминесцентные характеристики молока и молочных продуктов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 90–102. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.412>
- Belyakov M.V., & Nikitin E.A. (2023) Comparative evaluation of spectral luminescent characteristics of milk and dairy products. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 90–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.412>
- Беляков, М. В., Самарин, Г. Н., Ефременков, И. Ю., & Кудрявцев, А. С. (2023). Люминесцентные свойства молока различной жирности при скисании. *Электро-технологии и электрооборудование в АПК*, 70(1), 37–44. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2023-70-1-37-44>
- Belyakov M.V., Samarin G.N., Efremenkov I.Yu., & Kudryavtsev A.S. (2023). Luminescent properties of milk of different fat content during souring. *Electrical technologies and electrical equipment in agriculture*, (70), 37–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2023-70-1-37-44>
- Иванов, Ю. А. (2022). Стратегические направления развития молочного скотоводства. *Техника и технологии в животноводстве*, 2(46), 18–23. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-18>
- Ivanov Yu.A. Strategic directions of dairy cattle breeding development (2022). *Machinery and technologies in livestock*, 2(46), 18–23. (In Russ.). <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-18>
- Кулмырзаев, А. А., & Мачихин, С. А. (2007). Применение флуоресцентной спектроскопии для оценки качества термически обработанного молока. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (12), 69–72.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы оптические свойства в инфракрасном спектре молока при скисании и выбран спектральный диапазон и наиболее информативные параметры контроля в процессе хранения и переработки. Было выявлено, что при изменении кислотности молока наиболее сильно изменяются спектральные энергетические свойства поглощения. Статистические параметры спектров поглощения молока как в ближнем, так и в среднем инфракрасном диапазоне меняются несистемно и, зачастую, незначительно. Все спектры являются плосковершинными, в ближнем ИК диапазоне они имеют левостороннюю, а в средней ИК области — правостороннюю асимметрию. Полученные результаты свидетельствуют, что контроль кислотности молока в процессе хранения и переработки при скисании наиболее целесообразно осуществлять по поглощению в среднем ИК диапазоне, причем наиболее информативная область спектра 8–12,5 мкм.

Ограничением данного исследования является ограниченный спектральный диапазон измерений и ограничение изменения титруемой кислотности молока. Дальнейшим развитием результатов этого исследования является разработка инфракрасных приборов контроля кислотности молока в процессе его хранения и переработки. В целом, исследование подчеркивает значимость и потенциал применения спектроскопии инфракрасного диапазона для контроля параметров скисания молока.

- Kulmyrzaev, A. A., & Machikhin, S. A. (2007). The use of fluorescence spectroscopy to assess the quality of thermally processed milk. *Storage and Processing of Farm Products*, (12), 69–72. (In Russ.).
- Лукашенко, Е. И. (2014). Применение флуоресцентного метода для контроля качества. *Молочнохозяйственный вестник*, 1(13), 65–70.
- Lukashenko, E. I. (2014). The use of the fluorescent method for quality control. *Dairy Farming Bulletin*, (1), 65–70. (In Russ.).
- Мельденберг, Д. Н., Полякова, О. С., Семенова, Е. С., & Юрова, Е. А. (2020). Разработка комплексной оценки белкового состава молока сырья различных сельскохозяйственных животных для выработки продуктов функциональной направленности. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 118–133. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352>
- Meldenberg, D. N., Polyakova, O. S., Semenova, E. S., & Yurova, E. A. (2020). Development of a comprehensive assessment of the protein composition of milk of raw materials of various farm animals for the production of functional products. *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 118–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352>
- Самарин, Г.Н., Беляков, М.В., Ефременков, И.Ю., & Ляшук, Ю.О. (2024). Обнаружение антибиотиков в молоке по его фотолюминесцентным свойствам. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*, 71(1), 10–16. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16>.
- Samarin, G.N., Belyakov, M.V., Efremenkov, I.Yu., & Lyashchuk, Yu.O. (2024). Detection of antibiotics in milk by its photoluminescent properties. *Electrical technologies and electrical equipment in agriculture*, (71), 10–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16>.
- Святкина, Л. И., & Андрухова, В. Я. (2009). Оценка подлинности продукции из коровьего молока методом газовой хроматографии. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (10), 20–23.
- Svyatkina, L. I., & Andrukhnova, V. Ya. (2009). Assessment of the authenticity of cow's milk products by gas chromatography. *Storage and Processing of Farm Products*, (10), 20–23. (In Russ.).
- Топникова, Е. В., Новокшанова, А. Л., Пирогова Е. Н., & Рыжакина, Т. П. (2023). Оценка гигиенических и микробиологических рисков при переработке молока в России. *Молочнохозяйственный вестник*, 1(49), 193–214. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_1_193
- Topnikova, E. V., Novokshanova, A. L., Pirogova E. N., & Ryzhakina, T. P. (2023). Assessment of hygienic and microbiological risks in milk processing in Russia. *Dairy Bulletin*, (1), 193–214. (In Russ.). https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_1_193
- Хамнаева, Н. И., Батуева, Д. М., & Данжеева, Э. К. (2009). Сравнительная оценка импульсной электронно-пучковой и термической обработок молока и молочной сыворотки с помощью ИК-спектроскопии. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (6), 21–23.
- Khamnaeva, N. I., Batueva, D. M., & Danzheeva, E. K. (2009). Comparative evaluation of pulsed electron beam and thermal treatment of milk and whey using IR spectroscopy. *Storage and Processing of Farm Products*, (6), 21–23. (In Russ.).
- Khurshudyan, S. A., Lazareva, E. G., Ryabova, A. E., & Mikhailova, I. Y. (2020). Analytical measurements in the examination of food products. *Product quality Control*, (6) 38–41. <https://doi.org/10.35400/2541-9900-2020-6-38-41> (In Russ.).
- Andrade, J., Pereira, C. G., de Almeida Junior, J. C., Ramos Viana, C. C., de Oliveira Neves, L. N., Fonseca da Silva, P. H., Bell, M. J. V., & de Carvalho dos Anjos, V. (2019). FTIR-ATR determination of protein content to evaluate whey protein concentrate adulteration. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 99, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.079>
- Buzdar, M., Yaqub, A., Hayat, A., Zia Ul Haq, M., Khan, A., & Ajab, H. (2023). Paper based colorimetric sensor using novel green magnetized nanocomposite of pinus for hydrogen peroxide detection in water and milk. *Food Bioscience*, 55, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103014>
- Currò, S., Manuelian, C.L., Penasa, M., Cassandro, M., De Marchi, M. (2017). Technical note: Feasibility of near infrared transmittance spectroscopy to predict cheese ripeness. *Journal of Dairy Science*, 100(11), 8759–8763. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13001>
- Daniloski, D., McCarthy, N. A., O'Callaghan, T. F., & Vasiljevic, T. (2022). Authentication of β -casein milk phenotypes using FTIR spectroscopy. *International Dairy Journal*, 129, 105350. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105350>
- Grewal, M. K., Huppertz, T., & Vasiljevic, T. (2018). FTIR fingerprinting of structural changes of milk proteins induced by heat treatment, deamidation and dephosphorylation. *Food Hydrocolloids*, 80, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.010>
- Holroyd, S. E. (2013). The use of near Infrared Spectroscopy on Milk and Milk Products. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 21(5), 311–322. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1055>
- Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*, 43, 8200–8214. <https://doi.org/10.1039/C4CS00062E>
- Markoska, T., Huppertz, T., Grewal, M. K., & Vasiljevic, T. (2019). FTIR analysis of physiochemical changes in raw skim milk upon concentration. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 102, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.011>
- Portnoy, M., Coon, C., & Barbano, D.M. (2021). Infrared milk analyzers: Milk urea nitrogen calibration. *Journal of Dairy Science*, 104(7), 7426–7437. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18772>

- Pu, Y.-Y., O'Donnell, C., Tobin, J. T., & O'Shea, N. (2020). Review of near-infrared spectroscopy as a process analytical technology for real-time product monitoring in dairy processing. *International Dairy Journal*, 103, 104623. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104623>
- Temizkan, R., Can, A., Dogan, M. A., Mortas, M., & Ayvaz, H. (2020). Rapid detection of milk fat adulteration in yoghurts using near and mid-infrared spectroscopy. *International Dairy Journal*, 110, 104795. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104795>
- Toffanin, V., De Marchi, M., Lopez-Villalobos, N., & Cassandro, M. (2015). Effectiveness of mid-infrared spectroscopy for prediction of the contents of calcium and phosphorus, and titratable acidity of milk and their relationship with milk quality and coagulation properties. *International Dairy Journal*, 41, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.10.002>
- Visconti, L. G., Rodríguez, M. S., & Di Anibal, C. V. (2020). Determination of grated hard cheeses adulteration by near infrared spectroscopy (NIR) and multivariate analysis. *International Dairy Journal*, 104, 104647. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104647>
- Wang, Y., Guo, W., Zhu, X. & Liu, Q. (2019). Effect of homogenisation on detection of milk protein content based on NIR diffuse reflectance spectroscopy. *International Journal of Food Sciences and Technology*, 54, 387–395. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13948>