

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ / FOOD SYSTEMS

УДК 637.13:628.9.037

doi: 10.15507/2658-4123.032.202203.460-475

Научная статья



Изменение спектральных фотолюминесцентных свойств молока при скисании

М. В. Беляков¹✉, Г. Н. Самарин¹, А. А. Кудрявцев¹,
И. Ю. Ефременков²

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(г. Москва, Российская Федерация)

✉ bmw20100@mail.ru

Аннотация

Введение. Применение цифровых технологий позволит увеличить эффективность животноводства. К таким технологиям можно отнести оптический мониторинг качества продукции. Цель исследования – изучение зависимости спектральных характеристик и параметров возбуждения и люминесценции молока при скисании.

Материалы и методы. Для измерений использовали молоко с жирностью 3,2 %. Кислотность контролировали титриметрическим методом. Спектры возбуждения и регистрации люминесценции измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» в диапазоне 200–500 нм. Вычисляли интегральные и статистические параметры спектров в программах PanoramaPro и Microcal Origin.

Результаты исследования. При скисании молока спектры возбуждения смещаются вниз, при этом в диапазоне 350–500 нм наблюдается качественное изменение характеристик, хотя абсолютный уровень фотосигнала почти на порядок меньше, чем при 220–340 нм. Поток фотолюминесценции при возбуждении излучением с длиной волны 262 нм уменьшается в процессе скисания. Поток при возбуждении излучением 385 нм, наоборот, увеличивается, особенно за первые трое суток. Поток при возбуждении 442 нм уменьшается незначительно. Статистические параметры и энергия спектров фотолюминесценции неинформативны для контроля скисания молока. Зависимость отношения потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 385 и 442 нм от кислотности линейно аппроксимируется с коэффициентом детерминации 0,99.

Обсуждение и заключение. Изменение люминесцентных свойств молока можно использовать как маркер его скисания с контролем кислотности. Для создания метода контроля показателей качества молока при скисании наиболее информативным является использование длин волн возбуждения 385 и 442 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в диапазонах 440–490 и 490–600 нм соответственно.

Ключевые слова: молоко, кислотность, оптические спектры, поток фотолюминесценции, линейная регрессионная модель

© Беляков М. В., Самарин Г. Н., Кудрявцев А. А., Ефременков И. Ю., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Изменение спектральных фотолюминесцентных свойств молока при скисании / М. В. Беляков [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 3. С. 460–475. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>

Original article

Change of Spectral Photoluminescent Properties of Milk during Souring

M. V. Belyakov^a✉, G. N. Samarin^a, A. A. Kudryavtsev^a,
I. Yu. Efremenkov^b

^a Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

^b Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation)

✉ bmw20100@mail.ru

Abstract

Introduction. The use of digital technologies will increase the efficiency of animal husbandry. These technologies include optical monitoring of product quality. The aim of the research is to study the dependence of the spectral characteristics and parameters of excitation and luminescence of milk during souring.

Materials and Methods. The milk with a fat content of 3.2% was used for measurements. The acidity was controlled by the titrimetric method. The excitation and luminescence registration spectra were measured on a Fluorat-02-Panorama spectrofluorimeter in the range of 200–500 nm. Spectra parameters were calculated in the PanoramaPro and Microcal Origin programs.

Results. When milk sours, excitation spectra shift downwards, while a qualitative change in characteristics is observed with the range of 350–500 nm, although the photoelectric signal absolute level is almost an order of magnitude less than with a range of 220–340 nm. The photoluminescence flux when excited by the radiation with wavelength of 262 nm decreases during the souring process. The flux excited by the radiation with wavelength of 385 nm increases especially in the first three days. The flux at wavelength of 442 nm decreases slightly. Statistical parameters and energy of photoluminescence spectra are not informative for the milk souring control. The dependence of the ratio of photoluminescence fluxes excited by the radiation of 385 and 442 nm on acidity is linearly approximated with a determination coefficient of 0.99.

Discussion and Conclusion. The change in the milk luminescent properties can be used as a marker of its souring with acidity control. To create a method for monitoring milk quality indicators during souring, the most informative is the use of excitation wavelengths of 385 and 442 nm with subsequent registration of photoluminescence in the ranges 440–490 and 490–600 nm respectively.

Keywords: milk, acidity, optical spectra, photoluminescence flux, linear regression model

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Belyakov M.V., Samarin G.N., Kudryavtsev A.A., Efremenkov I.Yu. Change of Spectral Photoluminescent Properties of Milk during Souring. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(3):460–475. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202203.460-475>

Введение

Применение стремительно развивающихся цифровых технологий, системы интернета вещей, роботизированных комплексов и искусственного интеллекта позволит многократно увеличить эффективность сельскохозяйственного производства, в том числе животноводства. Здесь возможно повышение производительности труда, снижение энергетических и материальных затрат, обеспечение экологической безопасности сельскохозяйственного производства и окружающей среды. При разработке концепции интеллектуального сельского хозяйства выделяют следующие сферы применения цифровых технологий: комплексное управление сельскохозяйственным производством; цифровые технологии в растениеводстве, животноводстве, энергообеспечении, хранении и переработке продукции¹ [1].

Важным условием эффективного производства и переработки молока на молочно-товарных фермах, особенно в крестьянских (фермерских) хозяйствах, является:

- мониторинг состояния дойного стада и каждой коровы индивидуально;
- мониторинг качества получаемой продукции;
- контроль исправности технологического оборудования доения и первичной обработки молока и управление этими технологическими процессами;
- оптимизация энергетических и экономических затрат при доении коров, первичной обработке и переработке молока [2].

Перечисленные задачи могут быть решены путем использования данных, получаемых по результатам измерения показателей качества молока.

Схема контроля сырья, продуктов и технологического процесса

в различных экономических зонах включает следующую информацию:

1. Показатель;
2. Норма;
3. Метод отбора проб;
4. Метод исследований.

Методы исследований молока и молочных продуктов (табл. 1). Таблица 1 подготовлена на основе распоряжения (ЕС) № 854/2004 Европейского парламента и Совета от 29 апреля 2004 г., устанавливающего особые правила, касающиеся организации официальных контролей в отношении продуктов животного происхождения, предназначенных для употребления в пищу человеком².

Из таблицы 1 видно, что для определения пяти показателей (жир, белок, лактоза, мочевины, количество соматических клеток) оценки качества молока и молочных продуктов в Европейском союзе (ЕС) используются оптические методы исследования. В данной работе мы исследуем возможность применения оптического метода для определения кислотности молока, которая напрямую связана с общим количеством бактерий (строка 3 таблицы 1). При написании работы учитывались результаты ранее проведенного исследования [3].

Цель исследования – изучение зависимости спектральных характеристик и параметров возбуждения и люминесценции молока при скисании.

Обзор литературы

Физические методы диагностики широко применяются для контроля различных показателей качества молока и молочных продуктов. По диэлектрической проницаемости и коэффициенту диэлектрических потерь определяли содержание лактозы цельного и обезжиренного молока [4].

¹ Измайлов А. Ю., Цой Ю. А., Кирсанов В. В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм : моногр. М. : ИНФРА-М, 2019. 208 с.

² URL: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/usefulinf/files/es854-2004.pdf> (дата обращения: 10.04.2022).

Применяемые методы исследований молока в ЕС
Applied methods of milk research in the EU

Показатели молока / Milk indicators	Методы / Methods
Жир, белок, лактоза, мочевины / Fat, protein, lactose, urea	Метод Гербера (ISO 2446); метод Росе – Готлиба (ISO 1211); метод Къельдаля (ISO 8968); метод инфракрасного излучения (ISO 9622) / Gerber method (ISO 2446); Rose – Gottlieb method (ISO 1211); Kjeldahl method (ISO 8968); infrared radiation method (ISO 9622)
Количество соматических клеток / Number of somatic cells	Подсчет соматических клеток в молоке микроскопическим методом (ISO 13366-1); подсчет соматических клеток в молоке флуоресцентным методом (ISO 13366-3) / Counting somatic cells in milk by microscopic method (ISO 13366-1); counting somatic cells in milk by fluorescent method (ISO 13366-3)
Общее количество бактерий / Total number of bacteria	Определение бактериальной обсемененности по подсчету колоний при 30 °C (ISO 4833) / Determination of bacterial infestation by colony count at 30°C (ISO 4833)
Температура заморозания / Freezing temperature	Метод термисторного криоскопа (ISO 5764) / Thermistor cryoscope method (ISO 5764)
Ингибирующие вещества / Inhibitory substances	Микробиологический метод / Microbiological method
Хлорамфениколь / Chloramphenicol	Метод иммуноферментного анализа / Enzyme immunoassay method

Контролировали профили нелетучих метаболитов сырого молока посредством протонного ядерного магнитного резонанса [5]. С помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии находили тепловые показатели молока [6] и количество аскорбиновой кислоты в ней [7]. Остатки хлорорганических пестицидов в образцах пастеризованного и ультрапастеризованного молока определяли методом хромато-масс-спектрометрии [8]. Остатки антибиотиков (пенициллина G, ампициллина и тетрациклина) в цельном молоке определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии [9].

В молочной промышленности спектроскопия в ближней и средней инфракрасной области использовалась в качестве лабораторного аналитического метода для анализа состава молочных продуктов с 1970-х годов [10]. Так, например, в одной из работ было исследовано предсказание минералов

молока с помощью инфракрасных спектров в области 2,0–10,8 мкм [11]. Приборами среднего инфракрасного диапазона измеряли данные по жиру, белку, лактозе и концентрации азота мочевины в молоке [12]. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье использовалась для прогнозирования признаков, которые являются дорогостоящими и трудно поддающимися измерению у молочного скота (показатель упитанности, β -гидроксипутират к-казеин) [13]. Спектроскопические прогнозы биомаркеров в молоке может повысить точность геномного прогнозирования β -гидроксимасляной кислоты, жирных кислот и мочевины [14].

Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона широко используется для определения различных характеристик состава многих молочных продуктов в промышленности. Данными методами прогнозируется химический состав большого количества

различных сыров [15–17]. Разработан способ, основанный на методах колебательной спектроскопии, для понимания биохимических изменений, происходящих в процессе созревания турецкого белого сыра, и для создания алгоритмов прогнозирования для определения содержания основных компонентов качества сыра и индикаторов созревания [18]. Образцы молока с известным подробным составом белка и данными о технологических признаках, сопровождаемые спектрами среднего инфракрасного диапазона, были доступны для оценки прогностической способности различных алгоритмов регрессии и классификации. Использование современных методов статистического машинного обучения для предсказания признаков с помощью спектроскопии среднего инфракрасного диапазона может повысить точность предсказания некоторых признаков [19]. Спектры среднего инфракрасного диапазона применяются для оценки свойств коагуляции и подкисления, а также характеристик выхода творога коровьего молока [20]. Средний инфракрасный спектр молока был предложен в качестве дополнительного источника информации для прогнозирования массы тела коров [21]. В другом исследовании сравнили четыре различных вида спектров (пропускание, отражение, поглощение и уменьшенное рассеяние) в ближней инфракрасной области для определения жира и белка молока [22].

Не менее информативной является фотолюминесцентная спектроскопия. Ранее люминесценция считалась фундаментальным методом изучения молекулярных свойств и функций структурных и биологически активных компонентов, поэтому ее применение к пищевым продуктам было ограничено. Затем с развитием современной недорогой приборной базы ее стали применять в мониторинге атрибутов

безопасности и качества пищевых продуктов во время обработки и хранения [23]. Исследован прототип датчика для мониторинга индуцированной сычужным ферментом коагуляции обезжиренного молока при различных концентрациях белка на основе профилей флуоресценции и обратного инфракрасного рассеяния при длинах волн 350 и 880 нм соответственно [24]. Спектроскопические исследования различных видов животного и растительного молока различного коммерческого происхождения подтвердили возможность использования рибофлавина для определения качества сортов молока путем измерения оптической плотности при 365 нм и интенсивности люминесценции около 520 нм (возбуждение при 365 нм) [25]. Количественное определение казеина в жидком молоке с различным соотношением казеина и сырого белка с использованием фронтальной флуоресцентной спектроскопии [26]. Поведение системы цельного молока (буйволиное, коровье и смешанное молоко), вызванное термодиссоциацией, было изучено методом стационарной флуоресцентной спектроскопии с использованием триптофана в качестве маркерной молекулы. Различное молекулярное окружение остатков триптофана в системах сырого молока проявляло различные флуоресцентные свойства [27].

Материалы и методы

Для измерений было взято питьевое пастеризованное молоко местной агрофирмы «Катынь» с массовой долей жира 3,2 %. После первых измерений молоко хранилось в темном помещении при комнатной температуре 20 °С. Условия хранения соответствовали техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности молока и молочной продукции» ТР ТС 033. Ежедневно перед сканированием молоко проверялось на скисание

органолептическим методом и тщательно перемешивалось.

Кислотность контролировали титриметрическим методом, который основан на нейтрализации кислот, содержащихся в продукте, раствором гидроксида натрия в присутствии индикатора фенолфталеина (по ГОСТу 3624-92)³. Допускаемая погрешность результата анализа при принятой доверительной вероятности $P=0,95$ составляет для молока $\pm 1,9$ °Т.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводили на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (производство фирмы «Люмэкс», Россия) с программным обеспечением RapogamaPro. Производили измерения спектральных характеристик возбуждения (поглощения) $\eta_e(\lambda)$ в диапазоне 200–500 нм по методике, описанной в другой работе [28]. Повторность измерений десятикратная. Для измерения спектра люминесценции $\varphi_l(\lambda)$ монохроматор возбуждения устанавливали на ту же длину волны, на которой наблюдается максимум спектра возбуждения при синхронном сканировании. Монохроматор регистрации люминесценции сканирует более длинноволновую область. Все спектры были скорректированы на инструментальные искажения возбуждения с помощью программных средств RapogamaPro. По полученным спектральным характеристикам определяли интегральную поглощательную способность H по формуле:

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

$\eta_e(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона возбуждения.

Интегральные параметры спектров $\varphi_l(\lambda)$, являющиеся потоками фотолюминесценции Φ , определяли по формуле:

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

где $\varphi_l(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона фотолюминесценции.

Представленная ниже методика расчетов статистических параметров была применена ранее в диссертационном исследовании одного из соавторов М. В. Белякова⁴. Математическое ожидание (среднее значение) M_λ определяется по формуле:

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $\varphi(\lambda)$ – распределение плотности вероятности; λ_1, λ_2 – минимальное и максимальное значение длин волн диапазона измерений фотолюминесценции.

Вычисление данного и последующих статистических параметров проводили в программе Microcal Origin.

Дисперсия σ^2 находится по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^2 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статистический момент 3-го порядка μ_3 :

$$\mu_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

На практике для оценки асимметричности используют коэффициент асимметрии As :

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (6)$$

³ ГОСТ 3624-92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. М. : Стандартиформ, 2009. 9 с.

⁴ Беляков М. В. Люминесцентный метод и оптико-электронные устройства экспресс-диагностики качества семян агрокультур : дис. ... д-ра техн. наук. Смоленск, 2020. 438 с.

При правосторонней асимметрии $As > 0$, при левосторонней симметрии $As < 0$. Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статического момента 4-го порядка μ_4 :

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

На практике за оценку коэффициента крутизны принимают искусственно созданную величину, которую назвали эксцессом E_λ :

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (8)$$

Для получения уравнения числовой характеристики энергии фотолюминесценции следует учитывать то, что каждый фотон фотолюминесценции обладает энергией, связанной с длиной волны излучения соотношением

$$E_{ph} = \frac{1240}{\lambda}, \quad (9)$$

где E_{ph} измеряется в эВ, а λ – в нм. Если известна дифференциальная функция распределения $\varphi(\lambda)$, то полная энергия спектра в диапазоне длин волн находится как:

$$E = 1240 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda} \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

Результаты исследования

В течение пяти суток измеряли спектры возбуждения. На четвертый и пятый день спектры возбуждения, кроме количественных изменений в диапазоне 230–350 нм, имели качественные изменения в диапазоне 350–500 нм (рис. 1). В целом при увеличении кислотности молока спектры возбуждения уменьшаются, при этом наблюдаются несколько пиков на длинах волн примерно 234, 262, 271, 287, 322 и 442 нм. На четвертый день появляется новый максимум примерно на 385 нм.

Результаты расчетов интегральных параметров спектров возбуждения по формуле (1) представлены в таблице 2.

Относительная погрешность определения интегральной поглощательной способности H молока составляет менее 5 % для надежности 0,95.

Интегральная поглощательная способность молока во всем диапазоне 200–500 нм не является информативной, поскольку количественные изменения происходят в диапазонах 220–340 нм, а также 350–500 нм. Зависимость интегральной поглощательной способности H в диапазоне 220–340 нм от времени скисания представлена на рисунке 2.

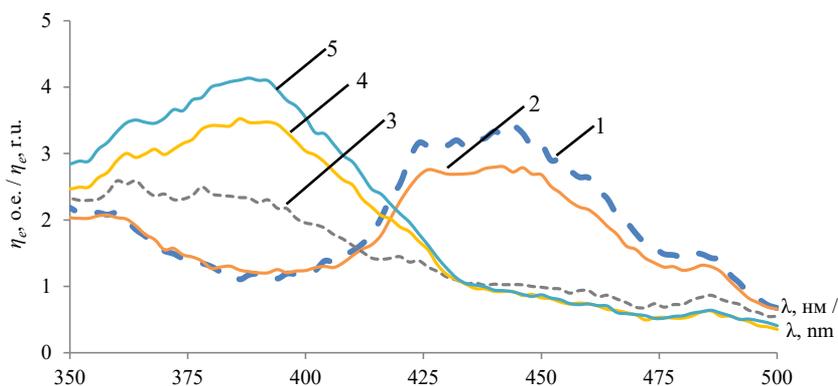
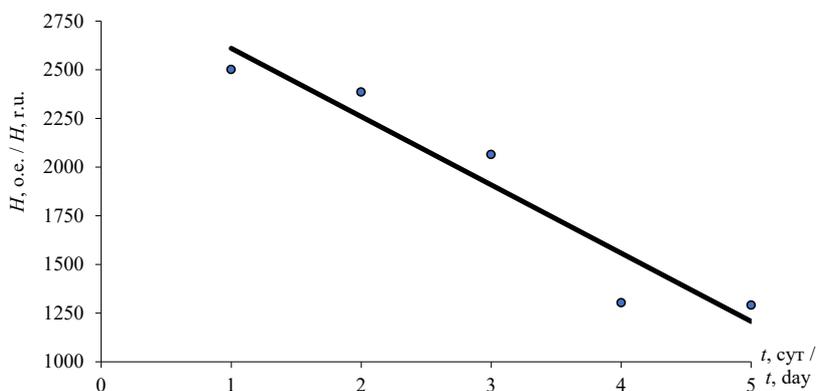


Рис. 1. Спектральные характеристики возбуждения молока в диапазоне 350–500 нм: 1 – 1 день; 2 – 2 день; 3 – 3 день; 4 – 4 день; 5 – 5 день

Fig. 1. Spectral characteristics of milk excitation of various souring degrees in the range of 350–500 nm: 1 – 1 day; 2 – 2 day; 3 – 3 day; 4 – 4 day; 5 – 5 day

Интегральные параметры спектров возбуждения молока различной степени скисания
Integral parameters of the excitation spectra of milk of various souring degrees

Сутки / Day	H , о. е. / H , r. u.	H , о. е. (для спектрального диапазона, нм) / H , r. u. (for the spectral range, nm)			
		220–340	350–500	356–420	420–500
1	$2\,823 \pm 108$	$2\,501 \pm 136$	294 ± 11	97 ± 3	184 ± 5
2	$2\,676 \pm 84$	$2\,385 \pm 95$	267 ± 6	98 ± 3	157 ± 4
3	$2\,315 \pm 112$	$2\,064 \pm 61$	223 ± 8	136 ± 4	73 ± 3
4	$1\,600 \pm 82$	$1\,303 \pm 54$	270 ± 13	190 ± 9	66 ± 2
5	$1\,626 \pm 62$	$1\,290 \pm 70$	306 ± 6	221 ± 8	65 ± 3



Р и с. 2. Интегральная поглощательная способность молока для диапазона 220–340 нм от времени скисания t

F i g. 2. Integral absorption capacity of milk for the range 220–340 nm from the souring time t

Коэффициент детерминации R^2 при линейной аппроксимации равен 0,91, то есть аппроксимация является достоверной. Уравнение аппроксимации:

$$H = -350t + 2\,960. \quad (11)$$

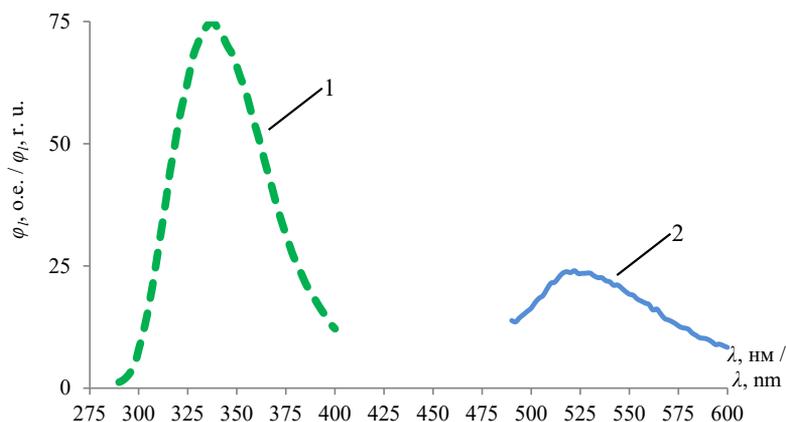
Спектральный диапазон 350–500 нм является интересным из-за качественного изменения характеристик возбуждения, хотя абсолютный уровень фотосигнала почти на порядок меньше.

В те же временные сроки измеряли спектры фотолюминесценции при возбуждении излучением с длинами волн 262, 385 и 442 нм. На рисунке 3

представлены характеристики для возбуждения 262 и 442 нм.

Результаты расчета интегральных потоков фотолюминесценции, полученных по формуле (2), представлены в таблице 3.

Поток фотолюминесценции при возбуждении излучением с $\lambda_e = 262$ нм уменьшается с течением времени, особенно в первые три дня (на 26 %). Затем идет стабилизация с небольшим увеличением. Поток фотолюминесцентного излучения при возбуждении $\lambda_e = 385$ нм, наоборот, увеличивается за первые трое суток на 19 %, после чего на четвертые сутки наступает стабилизация параметров. Фотолюминесцентный поток при



Р и с. 3. Спектральные характеристики люминесценции молока: 1 – для $\lambda_e = 262$ нм (при средней чувствительности приемника излучения); 2 – для $\lambda_e = 442$ нм (при высокой чувствительности приемника излучения)

F i g. 3. Spectral characteristics of milk luminescence: 1 – for $\lambda_e = 262$ nm (with medium sensitivity of the radiation receiver); 2 – for $\lambda_e = 442$ nm (with high sensitivity of the radiation receiver)

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Интегральные параметры спектров люминесценции молока различной степени скисания
Integral parameters of the luminescence spectra of milk of various souring degrees

Сутки / Day	$t, ч / t, h$	$\Phi_{262}, \text{о. е.} / \Phi_{262}, \text{г. у.}$	$\Phi_{385}, \text{о. е.} / \Phi_{385}, \text{г. у.}$	$\Phi_{442}, \text{о. е.} / \Phi_{442}, \text{г. у.}$
1	0	$4\,414 \pm 127$	78 ± 4	184 ± 3
	5,5	$4\,106 \pm 125$	78 ± 2	191 ± 7
2	21,5	$3\,931 \pm 68$	79 ± 4	187 ± 6
	28,5	$3\,527 \pm 84$	84 ± 4	148 ± 5
3	42,5	$3\,490 \pm 156$	92 ± 4	180 ± 7
	46,5	$3\,820 \pm 58$	93 ± 4	178 ± 7
4	71,5	$3\,829 \pm 46$	91 ± 4	176 ± 4
	74,5	$3\,650 \pm 101$	84 ± 4	175 ± 5

$\lambda_e = 442$ нм уменьшается незначительно (на 3 %), и уменьшение имеет несистемный характер.

Для анализа спектров определяли их статистические параметры: математическое ожидание, дисперсию, статистические моменты третьего и четвертого порядка, асимметрию, эксцесс, энергию спектра⁵. Результаты представлены в таблицах 4, 5.

В отличие от потока Φ статистические параметры $M_\lambda, \sigma^2, \mu_3, \mu_4, As, E_\lambda$ и энергия спектра E со временем меняются несистемно, хаотично и зачастую незначительно. Сравнивая данные таблиц 4 и 5, следует отметить, что при несистемности измененный разброс значений μ_3 и As для $\lambda_e = 442$ нм существенно (в 2,1–2,4 раза) больше, чем для $\lambda_e = 262$ нм. То же

⁵ Зиенко С. И., Беляков М. В., Малышкин В. В. Новые методы и средства спектрально-люминесцентного анализа семян растений : моногр. Смоленск : Универсум, 2020. 184 с.

наблюдается для σ^2 , μ_4 , E_i , но в меньшей степени.

Статистические параметры и энергия спектров фотолюминесценции не информативны для контроля кислотности молока.

Параллельно со спектральными измерениями определяли кислотность молока. Результаты определения кислотности молока (K) титриметрическим методом представлены в таблице 6.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Параметры спектров люминесценции молока при $\lambda_e = 262$ нм

Parameters of milk luminescence spectra at $\lambda_e = 262$ nm

Сутки / Day	t , ч / t , h	M_{λ} , нм / M_{λ} , nm	σ^2	μ_3	μ_4	A_s	E_i	E , эВ / E , eV
1	0	342	406	1 946	$4,14 \cdot 10^5$	0,24	-0,49	3,64
	5,5	342	403	2 127	$4,08 \cdot 10^5$	0,26	-0,49	3,64
2	21,5	342	403	1 978	$4,08 \cdot 10^5$	0,24	-0,49	3,64
	28,5	342	405	2 176	$4,15 \cdot 10^5$	0,26	-0,47	3,64
3	42,5	341	408	2 062	$4,19 \cdot 10^5$	0,25	-0,48	3,65
	46,5	341	408	2 171	$4,21 \cdot 10^5$	0,26	-0,47	3,65
4	71,5	341	410	1 949	$4,23 \cdot 10^5$	0,23	-0,48	3,65
	74,5	341	407	1 755	$4,15 \cdot 10^5$	0,21	-0,50	3,65

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Параметры спектров люминесценции молока при $\lambda_e = 442$ нм

Parameters of milk luminescence spectra at $\lambda_e = 442$ nm

Сутки / Day	t , ч / t , h	M_{λ} , нм / M_{λ} , nm	σ^2	μ_3	μ_4	A_s	E_i	E , эВ / E , eV
1	0	537	469	2 935	$5,34 \cdot 10^5$	0,29	-0,57	2,30
	5,5	537	458	1 832	$4,85 \cdot 10^5$	0,19	-0,69	2,32
2	21,5	537	496	4 581	$6,05 \cdot 10^5$	0,41	-0,54	2,31
	28,5	536	452	4 071	$5,07 \cdot 10^5$	0,42	-0,52	2,31
3	42,5	536	488	5 327	$6,05 \cdot 10^5$	0,49	-0,46	2,31
	46,5	536	487	4 862	$6,05 \cdot 10^5$	0,45	-0,45	2,31
4	71,5	537	464	3 467	$5,39 \cdot 10^5$	0,35	-0,50	2,31
	74,5	536	459	3 918	$5,24 \cdot 10^5$	0,40	-0,51	2,31

Т а б л и ц а 6

T a b l e 6

Кислотность молока K при различном времени хранения, °Т

Milk acidity K at different storage times, °Т

Проба / Sample	1 день (0 часов) / 1 day (0 hours)	2 день (21,5 часа) / 2 day (21.5 hours)	3 день (42,5 часа) / 3 day (42.5 hours)	4 день (71,5 часа) / 4 day (71.5 hours)
1	19	24	99	117
2	17	23	100	115
3	17	22	98	116
Среднее / Average	$18 \pm 1,9$	$23 \pm 1,7$	$99 \pm 1,7$	$116 \pm 1,7$

Зависимости потоков фотолюминесценции от кислотности были аппроксимированы линейными регрессионными моделями. Для $\lambda_e = 262$ нм коэффициент детерминации R^2 был равен 0,55, то есть модель статистически недостоверна. Статистически достоверны линейные модели для $\lambda_e = 385$ нм и $\lambda_e = 442$ нм, для которых коэффициенты детерминации равны 0,96 и 0,87 соответственно.

Для повышения чувствительности метода целесообразно измерять не абсолютное значение потока, а их соотношение Φ_{385} / Φ_{442} . При практической реализации это уменьшит влияние флуктуаций абсолютных величин потоков фотолюминесценции. Зависимость $\Phi_{385} / \Phi_{442} (K)$ представлена на рисунке 4.

Коэффициент детерминации данной зависимости равен 0,99.

Для определения кислотности молока необходима обратная зависимость $K(\Phi)$:

$$K = 961 \frac{\Phi_{385}}{\Phi_{442}} - 386. \quad (12)$$

Обсуждение и заключение

Очевидно, что химическая реакция

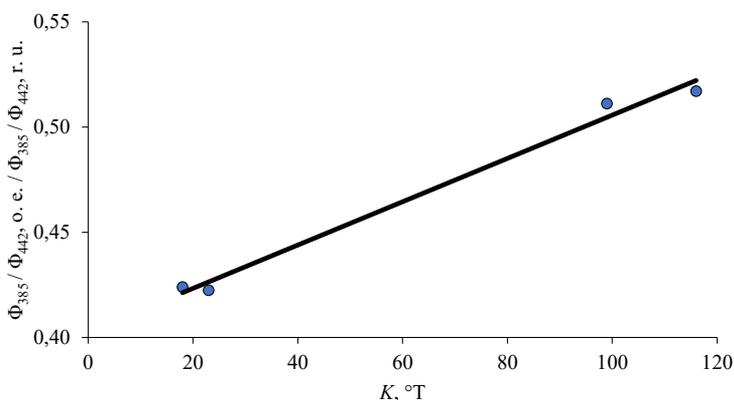


вызывала изменение люминесцентных свойств, и это изменение можно использовать в качестве маркера скисания молочных продуктов. Изменения люминесцентных характеристик и параметров молока при изменении кислотности могут быть связаны с изменением концентрации молочной кислоты. Интенсивность люминесценции $I_{л}$ пропорциональна квантовому выходу люминесценции η_3 , интенсивности возбуждающего света I_0 , коэффициенту поглощения при длине волны возбуждения ϵ , длине слоя l и концентрации люминесцирующего вещества $c_{л}$:

$$I_{л} = 2,3 I_0 \epsilon l c_{л} \eta_3. \quad (13)$$

Это уравнение является математическим основанием количественного люминесцентного анализа⁶.

В процессе скисания характеристики возбуждения снижаются в диапазоне 220–340 нм, при этом интегральная поглощательная способность уменьшается примерно в два раза. В диапазоне 350–500 нм происходят качественные изменения: уменьшение в диапазоне 420–500 нм и увеличение в диапазоне 356–420 нм.



Р и с. 4. Зависимость отношения потоков излучения Φ_{385} / Φ_{442} от кислотности молока

F i g. 4. Dependence of radiation flux ratio Φ_{385} / Φ_{442} on milk acidity

⁶ Беляков М. В. Люминесцентный метод и оптико-электронные устройства...

Для создания метода контроля показателей качества молока при скисании наиболее информативным является использование длин волн возбуждения 385 и 442 нм с последующей регистрацией фотолюминесценции в диапазонах 440–490 и 490–600 нм соответственно. Для длины волны 262 нм зависимость $\Phi_{\lambda}(K)$ является статистически достоверной. Статистические параметры спектров фотолюминесценции

меняются при скисании незначительно и несистемно и для диагностики молока не могут быть использованы.

Диапазон применения фотолюминесцентного метода определения кислотности составляет от 17 до 116 °С и может быть даже выше, в отличие от традиционных методов (титриметрического, рН-метрии), которые сильно зависят от консистенции скисшего молока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 4. С. 6–10. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
2. Optimization of Power and Economic Indexes of a Farm for the Maintenance of Cattle / G. N. Samarin [et al.] // *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing ; Ed. by P. Vasant, I. Zelinka, G. W. Weber. Vol. 1072. Cham : Springer, 2019. P. 679–689. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66
3. Identification of Organic Matter Dispersions Based on Light Scattering Matrices Focusing on Soil Organic Matter Management / N. F. Bunkin [et al.] // *ACS Omega*. 2021. Vol. 5, Issue 51. P. 33214–33224. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04906>
4. Liu Q., Guo W., Zhu X. Effect of Lactose Content on Dielectric Properties of Whole Milk and Skim Milk // *International Journal of Food Science & Technology*. 2018. Vol. 53, Issue 9. P. 2037–2044. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13790>
5. Comparative Metabolite Profiling of Raw Milk from Subclinical and Clinical Mastitis Cows Using ¹H-NMR Combined with Chemometric Analysis / M. Luangwilai [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2021. Vol. 56, Issue 1. P. 493–503. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14665>
6. Morales F.-J., Romero C., Jiménez-Pérez S. Characterization of Industrial Processed Milk by Analysis of Heat-Induced Changes // *International Journal of Food Science & Technology*. 2000. Vol. 35, Issue 2. P. 193–200. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x>
7. Development of an Improved Extraction and HPLC Method for the Measurement of Ascorbic Acid in Cows' Milk from Processing Plants and Retail Outlets / N. Chotyakul [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2014. Vol. 49, Issue 3. P. 679–688. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12350>
8. Determination of Organochlorine Pesticide Residues in Pasteurized and Sterilized Milk Using QuEChERS Sample Preparation Followed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry [Электронный ресурс] / C. Özdemir [et al.] // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019. Vol. 43, Issue 11. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14173>
9. Yildiz Ö., Unluturk S. Differential Scanning Calorimetry as a Tool to Detect Antibiotic Residues in Ultra High Temperature Whole Milk // *International Journal of Food Science & Technology*. 2009. Vol. 44, Issue 12. P. 2577–2582. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02087.x>
10. Review of Near-Infrared Spectroscopy as a Process Analytical Technology for Real-Time Product Monitoring in Dairy Processing [Электронный ресурс] / Y.-Y. Pu [et al.] // *International Dairy Journal*. 2020. Vol. 103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104623>
11. Genetic Analysis on Infrared-Predicted Milk Minerals for Danish Dairy Cattle / R. M. Zaalberg [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 8. P. 8947–8958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19638>

12. Portnoy M., Coon C., Barbano D. M. Infrared Milk Analyzers: Milk Urea Nitrogen Calibration // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 7426–7437. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18772>
13. Evaluating the Performance of Machine Learning Methods and Variable Selection Methods for Predicting Difficult-to-Measure Traits in Holstein Dairy Cattle Using Milk Infrared Spectral Data / L. F. M. Mota [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 8107–8121. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19861>
14. The Use of Milk Mid-Infrared Spectroscopy to Improve Genomic Prediction Accuracy of Serum Biomarkers / I. van den Berg [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 2. P. 2008–2017. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19468>
15. Accuracy and Biases in Predicting the Chemical and Physical Traits of Many Types of Cheeses Using Different Visible and Near-Infrared Spectroscopic Techniques and Spectrum Intervals / G. Stocco [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, Issue 11. P. 9622–9638. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16770>
16. Effectiveness of Two Different at-Line Instruments for the Assessment of Cheese Composition, Major Minerals and Fatty Acids Content [Электронный ресурс] / M. Franzoi [et al.] // *International Dairy Journal*. 2021. Vol. 123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105184>
17. Infrared Spectroscopy Combined with Chemometrics as a Convenient Method to Detect Adulterations in Cooking/Stretching Process in Commercial Cheese [Электронный ресурс] / M. Ozturk [et al.] // *International Dairy Journal*. 2022. Vol. 128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105312>
18. Monitoring the Ripening Attributes of Turkish White Cheese Using Miniaturized Vibrational Spectrometers / H. Yaman [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105, Issue 1. P. 40–55. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20313>
19. Predicting Cow Milk Quality Traits from Routinely Available Milk Spectra Using Statistical Machine Learning Methods / M. Frizzarin [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 7. P. 7438–7447. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19576>
20. Comparison of Bayesian and Partial Least Squares Regression Methods for Mid-Infrared Prediction of Cheese-Making Properties in Montbéliarde Cows / M. El Jabri [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, Issue 8. P. 6943–6958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16320>
21. Mining Data from Milk Mid-Infrared Spectroscopy and Animal Characteristics to Improve the Prediction of Dairy Cow's Liveweight Using Feature Selection Algorithms Based on Partial Least Squares and Elastic Net Regressions [Электронный ресурс] / L. Zhang [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106106>
22. He X., Fu X., Rao X. Model Robustness Improvement by Absorption and Reduced Scattering Spectra in Short Wave Near Infrared Spectral Region // *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 176. P. 114–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.013>
23. Colaruotolo L. A., Peters E., Corradini M. G. Novel Luminescent Techniques in Aid of Food Quality, Product Development, and Food Processing // *Current Opinion in Food Science*. 2021. Vol. 42. P. 148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.005>
24. Investigation of an in-Line Prototype Fluorescence and Infrared Backscatter Sensor to Monitor Rennet-Induced Coagulation of Skim Milk at Different Protein Concentrations / B. Panikuttira [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2020. Vol. 55, Issue 1. P. 175–182. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
25. Spectroscopy of an Intrinsic Fluorophore in Animal and Plant Milk for Potential Identification of Their Quality / L. Roy [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103, Issue 2. P. 1366–1376. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17034>
26. Ma Y. B., Amamcharla J. K. A Rapid Method to Quantify Casein in Fluid Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy Combined with Chemometrics // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104, Issue 1. P. 243–252. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799>
27. Investigation of Heat-Acid Induced Coagulation Behaviour of Whole Milk Systems Employing Front-Face Fluorescence Spectroscopy / P. Chakraborty [et al.] // *International Journal of Dairy Technology*. 2020. Vol. 73, Issue 4. P. 674–682. doi: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12726>

28. Belyakov M. V., Kulikova M. G., Gerts A. A. Control of Powdery Contents and Mass Rates of the Extract in the Dry Substance of Barley Malt by Photoluminescent Method // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. Vol. 57, Issue 1. P. 408–415. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15398>

Поступила 13.04.2022; одобрена после рецензирования 18.05.2022; принята к публикации 30.05.2022

Об авторах:

Беляков Михаил Владимирович, ведущий научный сотрудник лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, bmw20100@mail.ru

Самарин Геннадий Николаевич, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4972-8647>, Researcher ID: AAS-6885-2020, samaringn@yandex.ru

Кудрявцев Александр Алексеевич, научный сотрудник лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6122-0168>, Researcher ID: ABB-4048-2021, kudralex94@yandex.ru

Ефременков Игорь Юрьевич, студент Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, matiusharius@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М. В. Беляков – анализ литературных данных, описание методов и способа предварительной обработки, редактирование текста, составление выводов и заключения.

Г. Н. Самарин – научное руководство, формирование структуры статьи, доработка начального текста, составление выводов и заключения.

А. А. Кудрявцев – проведение измерений и расчетов.

И. Ю. Ефременков – проведение измерений и расчетов, подготовка начального варианта текста и иллюстраций.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Lobachevskiy Y.P., Dorokhov A.S. Digital Technologies and Robotic Devices in the Agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6–10. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

2. Samarina G.N., Vasilyev A.N., Dorokhov A.S., et al. Optimization of Power and Economic Indexes of a Farm for the Maintenance of Cattle. In: Vasant P., Zelinka I., Weber G.W. (eds.) *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1072. Cham: Springer; 2019. p. 679–689. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_66

3. Bunkin N.F., Glinushkin A.P., Shkirin A.V., et al. Identification of Organic Matter Dispersions Based on Light Scattering Matrices Focusing on Soil Organic Matter Management. *ACS Omega*. 2021;5(51):33214–33224. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04906>

4. Liu Q., Guo W., Zhu X. Effect of Lactose Content on Dielectric Properties of Whole Milk and Skim Milk. *International Journal of Food Science & Technology*. 2018;53(9):2037–2044. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13790>

5. Luangwilai M., Duangmal K., Chantaprasarn N., Settachaimongkon S. Comparative Metabolite Profiling of Raw Milk from Subclinical and Clinical Mastitis Cows Using ¹H-NMR Combined with Chemometric Analysis. *International Journal of Food Science & Technology*. 2021;56(1):493–503. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14665>
6. Morales F.-J., Romero C., Jiménez-Pérez S. Characterization of Industrial Processed Milk by Analysis of Heat-Induced Changes. *International Journal of Food Science & Technology*. 2000;35(2):193–200. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x>
7. Chotyakul N., Pateiro-Moure M., Martínez-Carballo E., et al. Development of an Improved Extraction and HPLC Method for the Measurement of Ascorbic Acid in Cows' Milk from Processing Plants and Retail Outlets. *International Journal of Food Science & Technology*. 2014;49(3):679–688. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12350>
8. Özdemir C., Özdemir S., Oz E., Oz F. Determination of Organochlorine Pesticide Residues in Pasteurized and Sterilized Milk Using QuEChERS Sample Preparation Followed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2019;43(11). doi: <https://doi.org/10.1111/jfpp.14173>
9. Yildiz Ö., Unluturk S. Differential Scanning Calorimetry as a Tool to Detect Antibiotic Residues in Ultra High Temperature Whole Milk. *International Journal of Food Science & Technology*. 2009;44(12):2577–2582. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02087.x>
10. Pu Y.-Y., O'Donnell C., Tobin J.T., O'Shea N. Review of Near-Infrared Spectroscopy as a Process Analytical Technology for Real-Time Product Monitoring in Dairy Processing. *International Dairy Journal*. 2020;103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104623>
11. Zaalberg R.M., Poulsen N.A., Bovenhuis H., et al. Genetic Analysis on Infrared-Predicted Milk Minerals for Danish Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(8):8947–8958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19638>
12. Portnoy M., Coon C., Barbano D.M. Infrared Milk Analyzers: Milk Urea Nitrogen Calibration. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7426–7437. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18772>
13. Mota L.F.M., Pego S., Baba T., et al. Evaluating the Performance of Machine Learning Methods and Variable Selection Methods for Predicting Difficult-to-Measure Traits in Holstein Dairy Cattle Using Milk Infrared Spectral Data. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):8107–8121. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19861>
14. Van den Berg I., Ho P.N., Luke T.D.W., et al. The Use of Milk Mid-Infrared Spectroscopy to Improve Genomic Prediction Accuracy of Serum Biomarkers. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(2):2008–2017. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19468>
15. Stocco G., Cipolat-Gotet C., Ferragina A., et al. Accuracy and Biases in Predicting the Chemical and Physical Traits of Many Types of Cheeses Using Different Visible and Near-Infrared Spectroscopic Techniques and Spectrum Intervals. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(11):9622–9638. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16770>
16. Franzoi M., Ghetti M., De Lorenzi C., De Marchi M. Effectiveness of Two Different at-Line Instruments for the Assessment of Cheese Composition, Major Minerals and Fatty Acids Content. *International Dairy Journal*. 2021;123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105184>
17. Ozturk M., Dogan M.A., Menevseoglu A., Ayvaz H. Infrared Spectroscopy Combined with Chemometrics as a Convenient Method to Detect Adulterations in Cooking/Stretching Process in Commercial Cheese. *International Dairy Journal*. 2022;128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105312>
18. Yaman H., Aykas D.P., Jiménez-Flores R., Rodríguez-Saona L.E. Monitoring the Ripening Attributes of Turkish White Cheese Using Miniaturized Vibrational Spectrometers. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(1):40–55. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20313>
19. Frizzarin M., Gormley I.C., Berry D.P., et al. Predicting Cow Milk Quality Traits from Routinely Available Milk Spectra Using Statistical Machine Learning Methods. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(7):7438–7447. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19576>
20. El Jabri M., Sanchez M.-P., Trossat P., et al. Comparison of Bayesian and Partial Least Squares Regression Methods for Mid-Infrared Prediction of Cheese-Making Properties in Montbéliarde Cows. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(8):6943–6958. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16320>

21. Zhang L., Tedde A., Ho P., et al. Mining Data from Milk Mid-Infrared Spectroscopy and Animal Characteristics to Improve the Prediction of Dairy Cow's Liveweight Using Feature Selection Algorithms Based on Partial Least Squares and Elastic Net Regressions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106106>
22. He X., Fu X., Rao X. Model Robustness Improvement by Absorption and Reduced Scattering Spectra in Short Wave Near Infrared Spectral Region. *Biosystems Engineering*. 2018;176:114–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.013>
23. Colaruotolo L.A., Peters E., Corradini M.G. Novel Luminescent Techniques in Aid of Food Quality, Product Development, and Food Processing. *Current Opinion in Food Science*. 2021;42:148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.005>
24. Panikuttira B., Payne F.A., O'Shea N., et al. Investigation of an in-Line Prototype Fluorescence and Infrared Backscatter Sensor to Monitor Rennet-Induced Coagulation of Skim Milk at Different Protein Concentrations. *International Journal of Food Science & Technology*. 2020;55(1):175–182. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.14267>
25. Roy L., Halder A., Singh S., et al. Spectroscopy of an Intrinsic Fluorophore in Animal and Plant Milk for Potential Identification of Their Quality. *Journal of Dairy Science*. 2020;103(2):1366–1376. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17034>
26. Ma Y.B., Amamcharla J.K. A Rapid Method to Quantify Casein in Fluid Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy Combined with Chemometrics. *Journal of Dairy Science*. 2021;104(1):243–252. doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799>
27. Chakraborty P., Bhattacharya B., Shivhare U., Basu S. Investigation of Heat-Acid Induced Coagulation Behaviour of Whole Milk Systems Employing Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *International Journal of Dairy Technology*. 2020;73(4):674–682. doi: <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12726>
28. Belyakov M.V., Kulikova M.G., Gerts A.A. Control of Powdery Contents and Mass Rates of the Extract in the Dry Substance of Barley Malt by Photoluminescent Method. *International Journal of Food Science & Technology*. 2022;57(1):408–415. doi: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15398>

Submitted 13.04.2022; approved after reviewing 18.05.2022; accepted for publication 30.05.2022

About the authors:

Mikhail V. Belyakov, Senior Researcher at the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: [ABB-2684-2020](https://orcid.org/0000-0002-4371-8042), bmw20100@mail.ru

Gennady N. Samarin, Chief Researcher, Head of the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4972-8647>, Researcher ID: [AAS-6885-2020](https://orcid.org/0000-0002-4972-8647), samaringn@yandex.ru

Alexander A. Kudryavtsev, Researcher at the Agricultural Products Processing Laboratory, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6122-0168>, Researcher ID: [ABB-4048-2021](https://orcid.org/0000-0002-6122-0168), kudralex94@yandex.ru

Igor Yu. Efremkov, Student of the Moscow Power Engineering Institute (14 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: [AGR-5540-2022](https://orcid.org/0000-0003-2302-9773), matiusharius@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Belyakov – analyzing literary data, describing the methods and way of preliminary processing, editing the text, drawing the conclusions.

G. N. Samarin – scientific guidance, forming the structure of the article, finalizing the initial text, drawing the conclusions.

A. A. Kudryavtsev – making measurements and calculations.

I. Yu. Efremkov – making measurements and calculations, preparing the initial version of the text and illustrations.

All authors have read and approved the final manuscript.