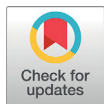


**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>EDN: <https://elibrary.ru/sycylt>

УДК / UDK 628.9.037-035.571:577.182

*Оригинальная статья / Original article***Обнаружение амоксициллина в молоке
методом анализа температурных зависимостей
фотолюминесценции****М. В. Беляков[✉], И. Ю. Ефременков***Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
г. Москва, Российская Федерация, <https://ror.org/05fhdx69>*[✉] bmw20100@mail.ru*Аннотация*

Введение. Наличие остаточных количеств антибиотиков в молоке представляет прямую угрозу для здоровья потребителей, провоцируя аллергические реакции и нарушения микрофлоры кишечника. Для производителей молочной продукции данная проблема обуславливает экономические потери из-за некондиционного состояния существенного количества партий сырья. Бесконтактный фотолюминесцентный контроль наличия амоксициллина в молоке позволит существенно повысить качество продукции и снизить экономические затраты на покупку одноразовых тест-систем. Для входного контроля сырья на перерабатывающих предприятиях и защиты прав потребителей необходима разработка чувствительных и оперативных методов диагностики, таких как анализ температурных спектров люминесценции.

Цель исследования. Оценка спектральных характеристик люминесценции молока, загрязненного амоксициллином при изменении температуры, а также определение информативных параметров и диапазонов спектра для полученных зависимостей $\varphi(T)$ при последующей разработке методики контроля наличия антибиотиков в молоке в технологическом процессе.

Материалы и методы. В качестве загрязняемой среды использовали молоко агрофирмы «Мичурино». Контроль наличия амоксициллина осуществляли тест-системой «BIOEASY» 4in1 BSCT. Измерение температурных спектров, а также возбуждения и люминесценции осуществляли на спектрофлуориметре CM 2203. Обработку спектров, расчет чувствительности осуществляли в программе Microcal Origin.

Результаты исследования. При нагревании молока с 10 до 60 °С происходит тушение люминесценции, точка перегиба температурного спектра молока без амоксициллина отличается от молока с амоксициллином. При возбуждении ультрафиолетовым излучением отношение разности интенсивности к температуре уменьшается от 28 до 83 % при добавлении в молоко амоксициллина. Аппроксимации низко- и высокотемпературных областей имеет коэффициент детерминации больше 0,97.

Заключение. Тушение люминесценции молока связано с денатурацией белка при увеличении температуры. Изменение точки перегиба температурных спектров

© Беляков М.В., Ефременков И.Ю., 2026

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

при добавлении амоксициллина в молоко может быть объяснено вкладом антибиотика в скорость денатурации белков. Для диагностики наличия антибиотиков в молоке целесообразно использовать источник излучения с $\lambda = 325$ нм, приемник излучения с режекторным фильтром, либо монохроматором, настроенным на $\lambda = 439$ нм, с последующим построением температурной зависимости в диапазоне 10–36 °C и расчетом чувствительности спектра. Результаты могут быть применены при разработке технологии фотолюминесцентного контроля молока в технологических процессах, связанных с изменением температуры.

Ключевые слова: молоко, амоксициллин, температурные спектры, оптическая диагностика, температурная чувствительность люминесценции

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Обнаружение амоксициллина в молоке методом анализа температурных зависимостей фотолюминесценции. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):561–577. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>

Determination of the Presence of Amoxicillin in Milk by the Temperature Photoluminescence Properties

M. V. Belyakov[✉], I. Yu. Efremenkov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
Moscow, Russian Federation, <https://ror.org/05fhdzx69>

✉ bmw20100@mail.ru

Abstract

Introduction. The presence of antibiotic residues of antibiotics in milk poses a direct threat to the health of consumers causing allergic reactions and intestinal microbiota dysbiosis. This problem also results in serious economic losses for dairy producers, because of the substandard condition of a significant amount of raw material batches. Non-contact photoluminescent monitoring of amoxicillin present in milk will significantly improve product quality and reduce the economic costs of purchasing single-use test systems. Therefore, the development of sensitive and operational diagnostic methods, such as the analysis of luminescence temperature spectra, is essential for incoming control of raw materials at processing plants and protecting consumer rights.

Aim of the Study. The article is aimed at studying spectral characteristics of luminescence of amoxicillin-contaminated milk when the temperature changes and at determining informative parameters and spectral ranges to find dependencies $\varphi(T)$ for developing a methodology to monitor the presence of antibiotics in milk in the technological processes.

Materials and Methods. The milk from the agricultural company “Michurino” was used to be contaminated. The presence of amoxicillin was monitored by the test system BIOEASY 4in1 BSCT. The temperature spectra and excitation and luminescence spectra were measured using the spectrofluorimeter CM 2203. The spectra were processed and sensitivity calculated using the software Microcal Origin.

Results. When heating the milk from 10 to 60 °C, the luminescence quenching occurs and the break point of the temperature spectrum of milk without amoxicillin differs from the break point of the temperature spectrum of milk with amoxicillin. When excited by ultraviolet radiation, the ratio of the intensity difference to temperature decreases from 28% to 83% when amoxicillin is added to the milk. The approximations of low-temperature and high-temperature areas have a coefficient of determination greater than 0.97.

Conclusion. Quenching the milk luminescence is related to protein denaturation with increasing temperature. The change in the temperature spectra ibreak point when amoxicillin is

added to milk can be explained by the contribution of the antibiotic to the protein denaturation rate. To detect the presence of antibiotics in milk, it is advisable to use a radiation source of $\lambda = 325$ nm, a radiation receiver with a notch filter or monochromator of $\lambda = 439$ nm, followed by constructing a temperature dependence in the range of 10–36 °C and calculating the spectrum sensitivity. The results can be used for developing photoluminescent milk control technology in technological processes that occur with temperature changes.

Keywords: milk, amoxicillin, temperature spectra, optical diagnostics, temperature sensitivity of luminescence

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

For citation: Belyakov M.V., Efremkov I.Yu. Determination of the Presence of Amoxicillin in Milk by the Temperature Photoluminescence Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):561–577. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.561-577>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности, контроль качества продукции, создание инновационных моделей с применением искусственного интеллекта являются одними из важных задач сельского хозяйства [1]. Внедрение цифровых систем и автоматизированного контроля в сельскохозяйственные предприятия необходимо для конкурентоспособности России [2]. В число таких контрольно-аналитических процедур может входить проверка на остаточное содержание антибиотиков в продуктах питания, в частности, в молоке. Производители сельхозпродукции, применяющие антибиотики, обязаны гарантировать безопасность продукции для потребителя [3; 4].

Пенициллиновая группа антибиотиков – одна из распространенных антибактериальных средств для лечения молочного скота [5]. Так, амоксициллин составляет 40,47 % от общего числа всех применяемых антибиотиков [6]. При бесконтрольном использовании антибиотики могут накапливаться в организме сельскохозяйственного животного и длительное время циркулировать в нем. Впоследствии их соединения могут мигрировать в продукты животноводства, такие как молоко и мясо. При употреблении этих продуктов у потребителя могут возникнуть иммунопатологические эффекты, репродуктивные расстройства и др. [7; 8]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка современных приборов и экспресс-методов для контроля содержания антибиотиков в молоке.

Получение зависимостей интенсивности люминесценции от температуры молока, а также их анализ в зависимости от концентрации амоксициллина позволит дать начало разработке доступных и простых в использовании аналитических приборов. В последующем будет возможен переход к системе тотального входящего и выходного контроля молока как на самой ферме, так и при приеме его на завод. Оптические методы, в том числе основанные на концентрационном и температурном тушении люминесценции, являются быстродействующими, селективными, неразрушающими и относительно недорогими. Применение данных технологий не только будет гарантировать безопасность готовой продукции для потребителя, но и даст экономические выгоды производителям путем предотвращения поступления непригодных партий сырья и экономии на экспресс-тестах, таких как тест-полоски.

Цель исследования – изучение температурных зависимостей спектральных характеристик люминесценции молока при загрязнении амоксициллином для

определения информативных диапазонов и последующей разработки методики контроля наличия антибиотиков. Для этого необходимо: измерить люминесцентные фотосигналы при различных температурах молока; аппроксимировать полученные зависимости и расчет параметров температурной чувствительности люминесценции молока; определить оптимальные длины волн возбуждения при температурном контроле люминесценции молока.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Широкое применение оптических методов для обнаружения антибиотиков в последние двадцать лет объясняется их ключевыми преимуществами: быстрый цикл анализа, высокая чувствительностью и простота [9].

В настоящий момент разработан метод для обнаружения антибиотиков в молоке, основанный на технологии биофотоники [10]. Зарубежные ученые создали оптический плазмонный сенсор, с помощью которого определяется наличие пенициллина в молоке [11], и оптоволоконный датчик для обнаружения бетта-лактамных антибиотиков в продуктах питания [12]. Исследователи из Турции и Китая активно применяют на практике метод поверхностного плазмонного резонанса для обнаружения антибиотиков [13; 14].

Для быстрого и чувствительного обнаружения амоксициллина в молоке широко применяются флуоресцентные зонды [15]. Они позволяют проводить селективный анализ, что делает их перспективной альтернативой традиционным способам [16].

Среди популярных методов диагностики антибиотиков в молоке активно используются современные инструментальные методы, такие как масс-спектрометрия, рамановская, инфракрасная и энергодисперсионная спектроскопия. Они обеспечивают высокую чувствительность и селективность анализа. Например, применение энергодисперсионной спектроскопии позволяет осуществлять детектирование амоксициллина в молоке [17]. На основе поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии разработан простой и недорогой метод определения следовых количеств амоксициллина [18]. Остаточное количество амоксициллина в молоке определяется с помощью масс-спектрометрии и жидкостной хроматографии [19]. Коллектив ученых из Бразилии изучил процесс обнаружения амоксициллина с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье для совершенствования мониторинга антибиотиков [20]. Однако применение данных методов требует наличия дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала и значительного времени на проведение исследований. Это обуславливает их малоприспособленность для повседневного оперативного контроля на фермах, молокозаводах и в пунктах приема сырья.

Использование нанотехнологий, таких как углеродные наноточки, открывает новые возможности для обнаружения следов антибиотиков в молоке. Разработаны углеродные наноточки, легированные азотом, с температурным и флуоресцентным сенсорами для диагностики тинидазола в молоке [21]. Синтезированы высокоаффинные наночастицы, которые используются при разработке сенсора на основе поверхностного плазмонного резонанса для обнаружения ципрофлоксацина, моксифлоксацина и офлоксацина в молоке [22]. Разработан нанофермент на основе полиоксометалата с активностью, имитирующей лакказы, для обнаружения канамицина с помощью колориметрического анализа в молоке [23].

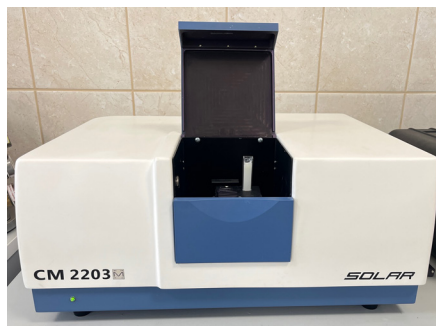
Изучена возможность диагностики амоксициллина в молоке с помощью люминесцентной спектроскопии [24]. С применением тербия Tb(III) разработан способ люминесцентной диагностики левофлоксацина [25]. Велась разработка функционализированного кремниевого нанозонда на основе комплекса европия Eu^{3+} для люминесцентного определения тетрациклина [26].

Анализ литературы показал, что в настоящее время недостаточно информации об изменениях температурных спектров фотолюминесценции при добавлении в молоко амоксициллина. Также неизвестно, может ли данное изменение быть уникальным бесконтактным способом для диагностики остаточных антибактериальных средств в молочном сырье. Ключевым пробелом является отсутствие систематических баз данных о температурных зависимостях молока с антибиотиками. В связи с этим есть необходимость в построении температурных спектров фотолюминесценции в диапазоне 10–60 °C для образцов с разной концентрацией антибиотика, что позволит разработать обоснованный критерий детектирования, не требующий сложной химической пробоподготовки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве исследуемого материала было использовано молоко агрофирмы «Мичурино» с жирностью 3,2 %. В него добавляли раствор амоксициллина для получения концентрации 0,004 мкг/см³, которая является пороговой в соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза 033/2013¹. В качестве арбитражного метода контроля антибиотиков использовали тестовый набор «BIOEASY» 4in1 BSCT. Измерение спектров возбуждения и люминесценции осуществляли в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазоне на спектрофлуориметре CM 2203 (рис. 1).



Р и с. 1. Внешний вид спектрофлуориметра CM 2203

F i g. 1. Appearance of the CM 2203 spectrofluorimeter

Источник: фотография для рисунка 1 сделана авторами статьи в июле 2025 г. в лаборатории Инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

Source: The photo for Figure 1 was taken by the authors of the article in July 2025, in the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

¹ О безопасности молока и молочной продукции. Технический регламент Таможенного союза 033/2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499050562> (дата обращения: 12.06.2025).

Данный спектрофлуориметр оборудован термостатируемым держателем для кварцевых кювет. Процесс варьирования температуры молока осуществляли в диапазоне от 10 до 60 °С с шагом 1 °С, параллельно осуществляя спектральные измерения. Система обратной связи на спектрофлуориметре, включающая датчик температуры и нагревательный элемент, автоматически регулировала мощность нагрева для поддержания заданной температуры, что гарантировало высокую стабильность в ходе эксперимента. Контроль температуры проводился в связи с выраженной зависимостью спектральных характеристик биологических объектов от термических условий.

Подбор длин волн для получения спектральных характеристик возбуждения молока осуществляли по максимумам спектральных характеристик при синхронном сканировании. Спектральные характеристики возбуждения молока измеряли с шагом 0,2 нм для получения их максимумов спектров. Полученные максимумы составляли 295, 325, 375 и 457 нм. Далее полученными максимумами длин волн осуществляли возбуждение молока и регистрацию люминесценции, а именно:

- $\lambda_e = 295$ нм, диапазон регистрации 300–450 нм;
- $\lambda_e = 325$ нм, диапазон регистрации 355–650 нм;
- $\lambda_e = 375$ нм, диапазон регистрации 420–660 нм;
- $\lambda_e = 457$ нм, диапазон регистрации 480–660 нм.

Люминесцентные характеристики, как и характеристики возбуждения, измеряли с шагом 0,2 нм, чувствительность фотоэлектронного умножителя «Средняя».

Измерение зависимости спектральной плотности потока от температуры $\varphi(T)$ осуществляли при средней чувствительности фотоэлектронного умножителя и низкой скорости сканирования для минимизации флуктуаций сигнала при измерениях. В качестве длин волн возбуждения и регистрации выбрали значения, являющиеся максимумами спектров возбуждения и люминесценции, а именно: $\lambda_e = 295$ нм, $\lambda_r = 360$ нм; $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 439$ нм; $\lambda_e = 375$ нм, $\lambda_r = 516$ нм; $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм.

Обработка результатов измерений

Для объективной оценки «точек излома» Ψ графиков $\varphi(T)$ при изменении их угла наклона осуществляли построение касательных к левому и правому участку кривых. После этого осуществляли их аппроксимацию линейными функциями с последующим расчетом коэффициента детерминации R^2 . В математическом пакете Microcal Origin находили точку пересечения Ψ аппроксимационных кривых. Абсцисса координат данной точки Ψ является граничной температурой излома T .

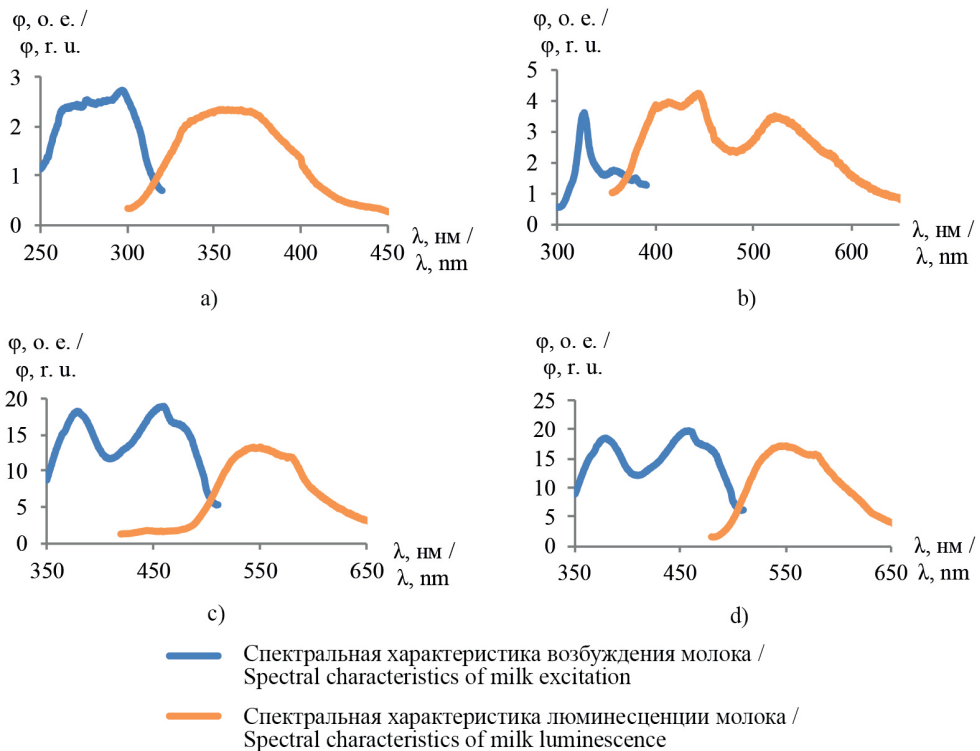
Чувствительность люминесценции S к изменению температуры вычисляли по формуле:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность конечной и начальной интенсивности фотолюминесценции (спектральной плотности потока) на участке температур ΔT , о. е.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе были получены спектры возбуждения. По их максимумам были подобраны эффективные длины волн излучения для получения максимального сигнала фотолюминесценции, после чего экспериментально установили оптимальные диапазоны ее регистрации (рис. 2).

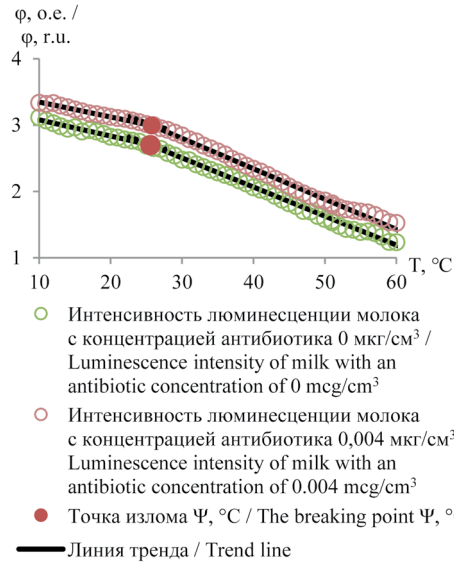


Р и с. 2. Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции молока при длинах волн возбуждения: а) 295 нм; б) 325 нм; в) 375 нм; г) 457 нм

F i g. 2. Spectral characteristics of excitation and luminescence of milk at excitation wavelengths: а) 295 nm; б) 325 nm; в) 375 nm; г) 457 nm

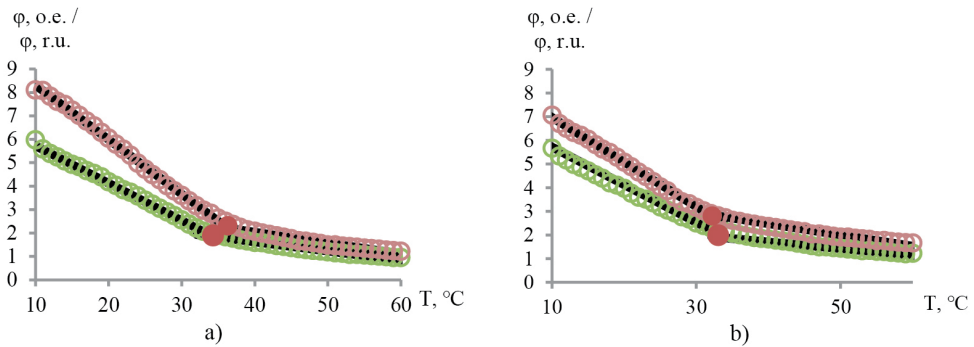
Источник: графики для рисунков 2–6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
Source: Figures 2–6 were compiled by the authors of the article with the use of Microsoft Excel.

На втором этапе были получены температурные спектры фотолюминесценции молока без амоксициллина и с пороговой его концентрацией $0,004 \text{ мкг/см}^3$. На рисунках 3–6 представлены спектры люминесценции молока с амоксициллином и без при возбуждении излучением 295, 325, 375 и 457 нм соответственно, а также их температурные зависимости $\varphi(T)$.



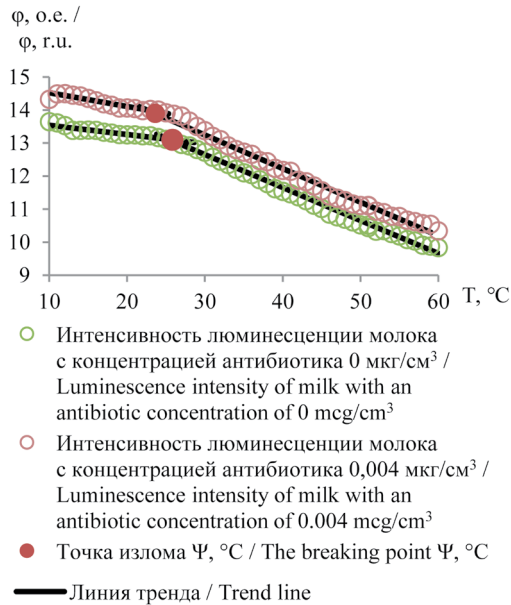
Р и с. 3. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 295$ нм, $\lambda_r = 360$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 3. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 295$ nm, $\lambda_r = 360$ nm



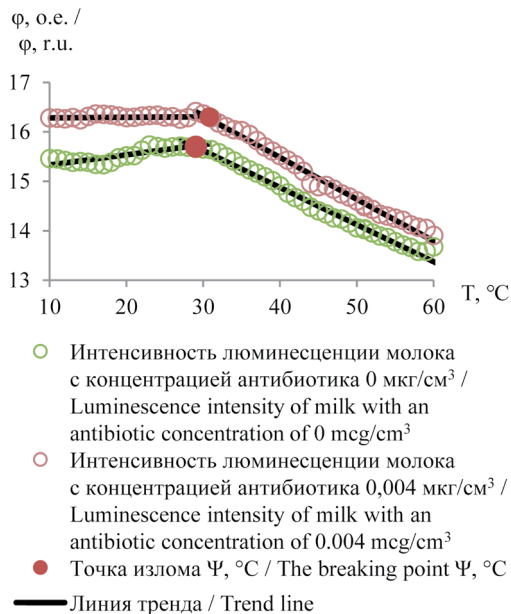
Р и с. 4. Температурные спектры люминесценции молока с различным содержанием амоксициллина: а) $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 439$ нм; б) $\lambda_e = 325$ нм, $\lambda_r = 516$ нм

F i g. 4. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content: а) $\lambda_e = 325$ nm, $\lambda_r = 439$ nm; б) $\lambda_e = 325$ nm, $\lambda_r = 516$ nm



Р и с. 5. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 375$ нм, $\lambda_r = 546$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 5. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 375$ nm, $\lambda_r = 546$ nm



Р и с. 6. Температурные спектры люминесценции при $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм молока с различным содержанием амоксициллина

F i g. 6. Temperature spectra of luminescence of milk with different amoxicillin content at $\lambda_e = 457$ nm, $\lambda_r = 542$ nm

Рассчитанные по формуле (1) параметры температурных спектров люминесценции представлены в таблице.

Т а б л и ц а
Table

Интегральные и температурные параметры спектров люминесценции молока
Integral and temperature parameters of milk luminescence spectra

λ_e , нм / λ_e , nm	λ_r , нм / λ_r , nm	Параметры / Parameters	C, мкг/см ³ / C, mcg/cm ³	
			0	0,004
295	360	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	25,5±0,3	25,7±0,2
		S_{10-26} , о. е./°C / S_{10-26} , г. у./°C	0,029±0,001	0,021±0,001
		S_{26-60} , о. е./°C / S_{26-60} , г. у./°C	0,042±0,001	0,043±0,002
		R^2_{10-26}	0,98±0,10	0,99±0,10
		R^2_{26-60}	0,99±0,10	0,99±0,10
325	439	Точка излома Ψ , °C / The breaking point Ψ , °C	34,3±0,2	36,3±0,3
		S_{10-36} , о. е./°C / S_{10-36} , г. у./°C	0,158±0,006	0,226±0,012
		S_{36-60} , о. е./°C / S_{36-60} , г. у./°C	0,038±0,002	0,042±0,002
		R^2_{10-36}	0,99±0,10	0,98±0,10
		R^2_{36-60}	0,97±0,10	0,99±0,10
	516	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	32,6±0,3	32,2±0,3
		S_{10-32} , о. е./°C / S_{10-32} , г. у./°C	0,162±0,007	0,196±0,008
		S_{32-60} , о. е./°C / S_{32-60} , г. у./°C	0,032±0,002	0,039±0,002
		R^2_{10-32}	0,99±0,10	0,97±0,10
		R^2_{32-60}	0,97±0,10	0,99±0,10
375	546	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	25,8±0,4	23,6±0,2
		S_{10-25} , о. е./°C / S_{10-25} , г. у./°C	0,039±0,002	0,028±0,001
		S_{25-60} , о. е./°C / S_{25-60} , г. у./°C	0,091±0,003	0,102±0,005
		R^2_{10-25}	0,97±0,10	0,99±0,10
		R^2_{25-60}	0,92±0,10	0,99±0,10
457	542	Точка излома Ψ , °C / The break point Ψ , °C	29,0±0,3	30,8±0,5
		S_{10-31} , о. е./°C / S_{10-31} , г. у./°C	0,0170±0,0008	0,0030±0,0001
		S_{31-60} , о. е./°C / S_{31-60} , г. у./°C	0,070±0,004	0,084±0,004
		R^2_{10-31}	0,84±0,10	0,31±0,10
		R^2_{31-60}	0,99±0,20	0,99±0,20

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.

Source: The table 1 was compiled by the authors of the article.

Полученные зависимости $\phi(T)$ следует разделить на два участка, каждый из которых можно аппроксимировать линейными характеристиками с точками излома Ψ . Относительная погрешность чувствительностей S не превышает 7 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные характеристики $\varphi(T)$ чистого молока количественно меньше, чем у молока с антибиотиком. Все характеристики можно разделить на две части: с разным наклоном и с выраженными точками излома Ψ . При $\lambda_e = 325$ нм зависимости $\varphi(T)$ вогнутые, а при длинах волн возбуждения 295, 375 и 457 нм – выпуклые.

Возбуждение на 295, 325 и 375 нм определяется в основном триптофаном, витамином А и белками [27–29]. Для $\lambda_e = 457$ нм основной вклад вносит рибофлавин – витамин В2 [30]. Значительное температурное тушение происходит при возбуждении излучением 295 и 325 нм: уменьшение сигнала фотolumинесценции φ относительно начальной (10 °С) и конечной (60 °С) температуры составляет от 60 до 79 %. Данное уменьшение сигнала в основном связано с денатурацией белка и в меньшей степени с флуктуациями триптофана и витамина А, так как в данном температурном диапазоне они практически не разрушаются. При длинах волн возбуждения 375 и 457 нм (рис. 5, 6) уменьшение интенсивности φ в температурном диапазоне 10–60 °С составляет от 12 до 29 %, так как витамин В2 считается стойким по отношению к нагреванию. Не все технологические температурные режимы при производстве молочных продуктов способны привести к разрушению антибактериальных препаратов [31].

Для каждой длины волны возбуждения имеется своя точка излома. Например, для $\lambda_e = 295$ нм и $\lambda_r = 360$ нм – $T = 25,5$ °С; для $\lambda_e = 325$ нм и $\lambda_r = 516$ нм – $T = 32,2$ °С и с добавлением антибиотика практически не изменяется. Для $\lambda_e = 325$ нм и $\lambda_r = 439$ нм, $\lambda_e = 375$ нм и $\lambda_r = 546$ нм – T уменьшается на 2 °С при добавлении амоксициллина. При $\lambda_e = 457$ нм и $\lambda_r = 542$ нм наоборот увеличивается на 1,8 °С. Т. е. по точке излома можно сделать вывод о наличии или отсутствии амоксициллина в молоке.

Чувствительность S , являющаяся отношением разности интенсивности люминесценции и температуры, вычисляемая по формуле (1), для областей с меньшими и большими температурами – разная. Например, с добавлением амоксициллина в молоко для $\lambda_e = 295$ нм и $\lambda_r = 360$ нм, $\lambda_e = 375$ нм и $\lambda_r = 546$ нм, $\lambda_e = 457$ нм и $\lambda_r = 542$ нм чувствительность в диапазоне температур 10–30 °С уменьшается на 38, 28 и 83 % соответственно. Для двумодальной фотolumинесцентной характеристики, возбуждаемой 325 нм и регистрируемой на $\lambda_r = 439$ нм и $\lambda_r = 516$ нм, наоборот увеличивается с добавлением антибиотика на 31 и 18 % соответственно. Расчет чувствительности в высокотемпературном диапазоне при длинах волн регистрации 360 и 439 нм не является информативным. С другой стороны, при $\lambda_r = 516$ нм и 546 нм чувствительность изменяется от 11 до 18 %.

При линейной аппроксимации участков зависимостей $\varphi(T)$ коэффициент детерминации $R^2 > 0,97$ на всех измеряемых длинах волн и температурных диапазонах, кроме $\lambda_e = 457$ нм, $\lambda_r = 542$ нм, где для молока без антибиотиков наблюдается плавномерное изменение сигнала в диапазоне температур от 10–31 °С с $R^2 = 0,84 \pm 0,1$, а с антибиотиками с $R^2 = 0,31 \pm 0,1$. Это может быть связано с влиянием амоксициллина на длинноволновую область возбуждения молока.

Относительная погрешность не превышает 2 % для точек излома Ψ и 5–7 % для чувствительности S в зависимости от температурной области измерения. При

определении коэффициентов детерминации графиков $\varphi(T)$ погрешность составляет до 10 % для длин волн возбуждения 295, 325 и 375 нм. Для длины волны возбуждения 457 нм данная погрешность возрастает до 35 %.

Ограничением исследования является измерения только в тех спектральных диапазонах, где происходит возбуждение фотолюминесценции (коротковолновый видимый и ближний ультрафиолетовый диапазон), а также необходимость учета времени нагрева и охлаждения пробы молока при внедрении данного метода в существующие технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные температурные характеристики могут быть учтены при разработке различных методик фотолюминесцентного контроля качества молока (наличие антибиотиков и других посторонних компонентов, кислотность, содержание белков, жиров и др.) в связи с тем, что температура меняется примерно от 37 °С у свежесквашенного молока до 3–5 °С при хранении. При этом меняются количественные параметры люминесценции. Так, наибольшая температурная стабильность фотолюминесцентного сигнала наблюдается при использовании длин волн возбуждения 295, 375 и 457 нм.

Для выявления антибиотиков в молоке по температурным свойствам рекомендуется методика, основанная на регистрации $\varphi(T)$ или интегрального потока $\Phi(T)$ в диапазоне 10–36 °С. При данных температурах молоко не подвергается существенному термическому разрушению. Методика включает в себя следующие этапы:

- возбуждение молока излучением от светодиодов либо лазера при длине волны $\lambda_e = 325$ нм;

- нагревание молока с шагом в 1 °С в диапазоне температур 10–36 °С и регистрация сигнала люминесценции φ на длине волны $\lambda_r = 439$ нм, используя приемник излучения с монохроматором или режекторным фильтром с последующим переводом полученного сигнала в цифровую форму микроконтроллером;

- построение графика $\varphi(T)$ молока с последующим расчетом чувствительности S . Если $S > 0,17$ – в молоке присутствует амоксициллин, если $S < 0,17$ – отсутствует.

Дальнейшим направлением исследования является расширение номенклатуры определяемых антибиотиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павкин Д.Ю., Юрочка С.С., Никитин Е.А., Рузин С.С., Базаев С.О. Инструменты для сбора и обработки больших данных в сельском хозяйстве. *Техника и технологии в животноводстве*. 2025;15(3):91–101. <https://doi.org/10.22314/27132064-2025-15-3-91>
2. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
3. Сулковская А.А., Почницкая И.М., Комарова Н.В. Исследование содержания антибиотиков в пищевых продуктах. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023;16(1):85–94. <https://elibrary.ru/edutvk>

4. Костомахин Н.М., Остроухова В.И., Ананьева Т.В. Контроль молока-сырья на содержание антибиотиков. *Ветеринария сельскохозяйственных животных*. 2024;(9):44–48. URL: <https://panor.ru/articles/kontrol-moloka-syrya-na-soderzhanie-antibiotikov/105825.html#> (дата обращения: 04.08.2025).
5. Чаплыгина О.С., Козлова О.В., Жарко М.Ю., Петров А.Н. Оценка биологической безопасности молочных продуктов, содержащих антибиотики. *Техника и технология пищевых производств*. 2023;53(1):192–201. <https://elibrary.ru/mgzxcxf>
6. Юрченко А.А., Глазунова Л.А., Гагарин Е.М., Глазунов Ю.В. Мониторинг контаминации молока-сырья остаточными количествами антибиотиков. *Международный вестник ветеринарии*. 2021;(4):64–69. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2021.4.64>
7. Чаплыгина О.С., Просеков А.Ю., Белова Д.Д. Определение остаточного количества антибиотиков в продуктах животного происхождения. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022;84(1):140–148. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-140-148>
8. Ключева А.В., Зайцева И.А., Роева Н.Н., Воронич С.С. Антибиотики: методы их обнаружения и аналитического контроля в пищевых продуктах. *Экологические системы и приборы*. 2021;(1):29–33. <https://doi.org/10.25791/esip.01.2021.1205>
9. Singh S., Chudasasma M., Singh S., Patra F., Duary R.K. Optical Techniques/Probes for the Detection of Antibiotic Residues in Milk and Dairy Products. *Optical Techniques for Assessing Food Adulterants*. 2025;(35):61–88. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8142-6_5
10. Demosthenous P., Aspri M., Moysesos M., Sergides M. MILI: Biophotonics Technology for In-Situ, Fast, Accurate and Cost-Effective Milk Analysis. In: Proceedings of the 13th International Conference on Photonics: Optics and Laser Technology – PHOTOPTICS. Porto: SciTePress; 2025;(1):64–73. <https://doi.org/10.5220/0013130100003902>
11. Safran V., Göktürk I., Bakhshpour M., Yılmaz F., Denizli A. Development of Molecularly Imprinted Polymer-Based Optical Sensor for the Sensitive Penicillin G Detection in Milk. *Chemistry Select*. 2021;6(43):11865–11875. <https://doi.org/10.1002/slct.202103058>
12. Nag P., Sadani K., Mohapatra S., Mukherji S., Mukherji S. Evanescent Wave Optical Fiber Sensors Using Enzymatic Hydrolysis on Nanostructured Polyaniline for Detection of β -Lactam Antibiotics in Food and Environment. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2299–2308. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04169>
13. Bakhshpour M., Göktürk I., Bereli N., Yılmaz F., Denizli A. Selective Detection of Penicillin G Antibiotic in Milk by Molecularly Imprinted Polymer-Based Plasmonic SPR Sensor. *Biomimetics*. 2021;6(4):72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040072>
14. Zhao Z., Yin H., Xiao J., Cui M., Huang R., Su R. Efficient Sequential Detection of Two Antibiotics Using a Fiber-Optic Surface Plasmon Resonance Sensor. *Sensors*. 2024;24(7):2126. <https://doi.org/10.3390/s24072126>
15. Muthukumar A., Kalaiyar S. Fluorescence Entrenched Probe for Onsite Detection of Amoxicillin Residue in Bovine Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):6387–6398. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03959-4>
16. Shi B., Yin Z., Tang X., Yu H., Cui S., Chen W. Exploration of Novel Dual-Emission NL-CDs/Cu–Cy–I Ratio Fluorescent Probe for the Sensitive Detection of Amoxicillin. *Journal of Materials Chemistry C*. 2024;12(33):13104–13114. <https://doi.org/10.1039/D4TC02183E>
17. Luiz L.C., Bell M.J.V., Batista R.T., Freitas R.P., Rocha R.A., Anjos V. Use of Energy Dispersive Spectroscopy and Principal Component Analysis for Detect Penicillin in Powdered Milk. *Practice and Research in Food Science and Technology*. 2020;(13):1–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.270200603>
18. Khrushchev A.Y., Akmaev E.R., Kis I.V., Gulyaeva A.Yu., Bondarenko V.O. Combination of HPLC and SERS Detection Applied to the Analysis of the Trace Content of Amoxicillin in Milk. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;(123):103473. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103473>
19. Ouma J., Gachanja A., Mugo S., Gikunju J. Antibiotic Residues in Milk from Juja and Githurai Markets in Kenya by Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. *Chemistry Africa*. 2021;(4):769–775. <https://doi.org/10.1007/s42250-021-00269-1>

20. Anjos V.P., Freire M.R.V.B., Stasi R., Silva D.F.T., Zezell D.M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Based Detection of Amoxicillin and Ampicillin for Advancing Antibiotic Monitoring with Optical Techniques. *Medical Sciences Forum*. 2025;35(1):7. <https://doi.org/10.3390/msf2025035007>
21. Qian Y., Chen G., Ma C., Li L., Yang T., Zhu C., et al. N-Doped Carbon Nanodots as Temperature Sensors and Fluorescent Probes for the Detection of Tinidazole in Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):7729–7739. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-04126-5>
22. Sullivan M.V., Henderson A., Hand R.A., Turner N.W. A Molecularly Imprinted Polymer Nanoparticle-Based Surface Plasmon Resonance Sensor Platform for Antibiotic Detection in River Water and Milk. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2022;(414):3687–3696. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04012-8>
23. Lu J., Xu X., Chen J. Polyoxometalate-Based Nanozyme with Laccase-Mimicking Activity for Kanamycin Detection Based on Colorimetric Assay. *Microchimica Acta*. 2024;(191):544. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06621-9>
24. Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Люминесцентная диагностика амоксициллина в молоке по статистическим параметрам спектров методом дискриминантного анализа. *Вестник КрасГАУ*. 2025;(6):245–256. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/95507/view> (дата обращения: 03.07.2025).
25. Wang A., Li Y., Zhao W., Liu J. A Tb (III) Coordination Polymer Based on 5-(2-(Pyrazole-1-yl) Pyridine-5-yl) Terephthalic Acid and its Visual Detection of Quinolone Antibiotics. *Polymers*. 2025;17(17):2277. <https://doi.org/10.3390/polym17172277>
26. Zhang Z., Wu M., Phan A.D.T., Alanazi M., Yong J., Xu Z.P., et al. Development of Europium(III) Complex Functionalized Silica Nanoprobe for Luminescence Detection of Tetracycline. *Methods*. 2023;(214):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2023.04.003>
27. Ayala N., Zamora A., Rinnan A., Saldo J., Castillo M. The Effect of Heat Treatment on the Front-Face Fluorescence Spectrum of Tryptophan in Skim Milk. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;(92):103569. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103569>
28. Kamal M., Karoui R. Monitoring of Mild Heat Treatment of Camel Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;(79):586–593. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.013>
29. Шишкина Л.Н., Козлов М.В., Константинова Т.В., Смирнова А.Н., Швыдкий В.О. Структурные группы природных фосфолипидов, участвующие в образовании комплексов с флавоноидами. *Химическая физика*. 2023;42(1):28–34. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010107>
30. Астанов С., Шарипов М.З., Файзуллаев А.Р., Курталиев Э.Н., Низомов Н. Термодеструкция рибофлавина в различных агрегатных состояниях. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014;81(1):40–45. <https://elibrary.ru/rstcfn>
31. Свириденко Г.М. Проблемы организации системного контроля антибиотиков в молоке и молочных продуктах. *Молочная промышленность*. 2020;(8):8–12. <https://elibrary.ru/jwugye>

REFERENCES

1. Pavkin D.Y., Yurochka S.S., Nikitin E.A., Ruzin S.S., Bazaev S.O. The Tools for Big Data in Agriculture Collecting and Processing. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2025;15(3):91–101. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/27132064-2025-15-3-91>
2. Lobachevskiy Ya.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.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
3. Sulkovskaya A.A., Pochickaya I.M., Komarova N.V. Investigation of the Content of Antibiotics in Food Products. *Food Industry: Science and Technologies*. 2023;16(1):85–94. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/edutvk>

4. Kostomahin N.M., Ostrouhova V.I., Ananyeva T.V. Control of Raw Milk for Antibiotics Content. *Veterinariya selskohozyajstvennyh zhivotnyh*. 2024;(9):44–48. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://panor.ru/articles/kontrol-moloka-syrya-na-soderzhanie-antibiotikov/105825.html#> (accessed 04.08.2025).
5. Chaplygina O.S., Kozlova O.V., Zharko M.Yu., Petrov A.N. Assessing the Biological Safety of Dairy Products with Residual Antibiotics. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(1):192–201. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/mgzxsf>
6. Yurchenko A.A., Glazunova L.A., Gagarin E.M., Glazunov Y.V. Monitoring of Contamination of Raw Milk with Residual Quantities of Antibiotics. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2021;(4):64–69. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2021.4.64>
7. Chaplygina O.S., Prosekov A.Y., Belova D.D. Determination of Antibiotic Residues in Animal Products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022;84(1):140–148. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-1-140-148>
8. Klyueva A.V., Zaytseva I.A., Roeva N.N., Voronich S.S. Antibiotics: Methods for their Detection and Analytical Control in Foods. *Ecological Systems and Devices*. 2021;(1):29–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25791/esip.01.2021.1205>
9. Singh S., Chudasasma M., Singh S., Patra F., Duary R.K. Optical Techniques/Probes for the Detection of Antibiotic Residues in Milk and Dairy Products. *Optical Techniques for Assessing Food Adulterants*. 2025;(35):61–88. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8142-6_5
10. Demosthenous P., Aspri M., Moyseos M., Sergides M. MILI: Biophotonics Technology for In-Situ, Fast, Accurate and Cost-Effective Milk Analysis. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Photonics: Optics and Laser Technology – PHOTOPTICS*. Porto: SciTePress; 2025;(1):64–73. <https://doi.org/10.5220/0013130100003902>
11. Safran V., Göktürk I., Bakhshpour M., Yilmaz F., Denizli A. Development of Molecularly Imprinted Polymer-Based Optical Sensor for the Sensitive Penicillin G Detection in Milk. *Chemistry Select*. 2021;6(43):11865–11875. <https://doi.org/10.1002/slct.202103058>
12. Nag P., Sadani K., Mohapatra S., Mukherji S., Mukherji S. Evanescent Wave Optical Fiber Sensors Using Enzymatic Hydrolysis on Nanostructured Polyaniline for Detection of β -Lactam Antibiotics in Food and Environment. *Analytical Chemistry*. 2021;93(4):2299–2308. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04169>
13. Bakhshpour M., Göktürk I., Bereli N., Yilmaz F., Denizli A. Selective Detection of Penicillin G Antibiotic in Milk by Molecularly Imprinted Polymer-Based Plasmonic SPR Sensor. *Biomimetics*. 2021;6(4):72. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040072>
14. Zhao Z., Yin H., Xiao J., Cui M., Huang R., Su R. Efficient Sequential Detection of Two Antibiotics Using a Fiber-Optic Surface Plasmon Resonance Sensor. *Sensors*. 2024;24(7):2126. <https://doi.org/10.3390/s24072126>
15. Muthukumar A., Kalaiyar S. Fluorescence Entrenched Probe for Onsite Detection of Amoxicillin Residue in Bovine Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):6387–6398. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03959-4>
16. Shi B., Yin Z., Tang X., Yu H., Cui S., Chen W. Exploration of Novel Dual-Emission NL-CDs/Cu–Cy–I Ratio Fluorescent Probe for the Sensitive Detection of Amoxicillin. *Journal of Materials Chemistry C*. 2024;12(33):13104–13114. <https://doi.org/10.1039/D4TC02183E>
17. Luiz L.C., Bell M.J.V., Batista R.T., Freitas R.P., Rocha R.A., Anjos V. Use of Energy Dispersive Spectroscopy and Principal Component Analysis for Detect Penicillin in Powdered Milk. *Practice and Research in Food Science and Technology*. 2020;(13):1–8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.270200603>
18. Khrushchev A.Y., Akmaev E.R., Kis I.V., Gulyaeva A.Yu., Bondarenko V.O. Combination of HPLC and SERS Detection Applied to the Analysis of the Trace Content of Amoxicillin in Milk. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;(123):103473. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103473>
19. Ouma J., Gachanja A., Mugo S., Gikunju J. Antibiotic Residues in Milk from Juja and Githurai Markets in Kenya by Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. *Chemistry Africa*. 2021;(4):769–775. <https://doi.org/10.1007/s42250-021-00269-1>

20. Anjos V.P., Freire M.R.V.B., Stasi R., Silva D.F.T., Zzell D.M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Based Detection of Amoxicillin and Ampicillin for Advancing Antibiotic Monitoring with Optical Techniques. *Medical Sciences Forum*. 2025;35(1):7. <https://doi.org/10.3390/msf2025035007>
21. Qian Y., Chen G., Ma C., Li L., Yang T., Zhu C., et al. N-Doped Carbon Nanodots as Temperature Sensors and Fluorescent Probes for the Detection of Tinidazole in Milk. *Journal of Fluorescence*. 2025;(35):7729–7739. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-04126-5>
22. Sullivan M.V., Henderson A., Hand R.A., Turner N.W. A Molecularly Imprinted Polymer Nanoparticle-Based Surface Plasmon Resonance Sensor Platform for Antibiotic Detection in River Water and Milk. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2022;(414):3687–3696. <https://doi.org/10.1007/s00216-022-04012-8>
23. Lu J., Xu X., Chen J. Polyoxometalate-Based Nanozyme with Laccase-Mimicking Activity for Kanamycin Detection Based on Colorimetric Assay. *Microchimica Acta*. 2024;(191):544. <https://doi.org/10.1007/s00604-024-06621-9>
24. Belyakov M.V., Efremenkova I.Yu. Luminescent Diagnostics of Amoxicillin in Milk by Spectra Statistical Parameters by the Discriminant Analysis Method. *Bulletin of KSAU*. 2025;(6):245–256. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/95507/view> (accessed 03.07.2025).
25. Wang A., Li Y., Zhao W., Liu J. A Tb (III) Coordination Polymer Based on 5-(2-(Pyrazole-1-yl) Pyridine-5-yl) Terephthalic Acid and its Visual Detection of Quinolone Antibiotics. *Polymers*. 2025;17(17):2277. <https://doi.org/10.3390/polym17172277>
26. Zhang Z., Wu M., Phan A.D.T., Alanazi M., Yong J., Xu Z.P., et al. Development of Europium(III) Complex Functionalized Silica Nanoprobe for Luminescence Detection of Tetracycline. *Methods*. 2023;(214):1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2023.04.003>
27. Ayala N., Zamora A., Rinnan A., Saldo J., Castillo M. The Effect of Heat Treatment on the Front-Face Fluorescence Spectrum of Tryptophan in Skim Milk. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;(92):103569. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103569>
28. Kamal M., Karoui R. Monitoring of Mild Heat Treatment of Camel Milk by Front-Face Fluorescence Spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;(79):586–593. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.013>
29. Shishkina L.N., Kozlov M.V., Konstantinova T.V., Smirnova A.N., Shvydkiy V.O. [Structural Groups of Natural Phospholipids Taking Part in Complexation with Flavonoids]. *Himicheskaya fizika*. 2023;42(1):28–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010107>
30. Astanov C., Sharipov M.Z., Faizullaev A.R., Kurtaliev E.N., Nizomov N. [Thermal Destruction of Riboflavin in Different Aggregate States]. *Zurnal prikladnoj spektroskopii*. 2014;81(1):40–45. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rstcfv>
31. Sviridenko G.M. [Problems of Organizing Systemic Control of Antibiotics in Milk and Dairy Products]. *Dairy Industry*. 2020;(8):8–12. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jwugye>

Об авторах:

Беляков Михаил Владимирович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: [ABB-2684-2020](https://orcid.org/ABB-2684-2020), bmw20100@mail.ru

Ефременков Игорь Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: [AGR-5540-2022](https://orcid.org/AGR-5540-2022), efremenkovich55@mail.ru

Вклад авторов:

М. В. Беляков – разработка или проектирование методологии исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации исследования.

И. Ю. Ефременков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; написание черновика рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 18.11.2025; поступила после рецензирования 23.01.2026;
принята к публикации 28.01.2026*

About the authors:

Mikhail V. Belyakov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institute Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, Researcher ID: ABB-2684-2020, bmw20100@mail.ru

Igor Yu. Efremenkov, Junior Researcher of the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of feeding in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institute Passage, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>, Researcher ID: AGR-5540-2022, efremenkovigor55@mail.ru

Authors contribution:

M. V. Belyakov – development or design of methodology; preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

I. Yu. Efremenkov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments collection; Preparation, creation of the published work, specifically visualization and data presentation; specifically writing the initial draft.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 18.11.2025; revised 23.01.2026; accepted 28.01.2026