

Люминесцентная диагностика молока, загрязненного левофлоксацином

Г. Н. Самарин[✉], доктор технических наук, главный научный сотрудник

М. В. Беляков, доктор технических наук, главный научный сотрудник

И. Ю. Ефременков, младший научный сотрудник

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., 5, стр. 1

[✉]samaringn@yandex.ru

Резюме. В кисломолочной продукции молоко с антибиотиками технологически недопустимо, так как в их присутствии ферментация продукта происходит медленно или вообще не происходит. При неправильном определении концентрации антибиотиков и попадании на поточно-технологическую линию приготовления пищевых продуктов вся партия готовой продукции может оказаться непригодной, поэтому качественный, дешевый, быстрый и своевременный тест на антибиотики в молоке-сырье защищает как здоровье покупателей, так и экономическую стабильность перерабатывающего предприятия. Цель исследования – изучение возможности фотолюминесцентного определения содержания левофлоксацина в молоке. Для экспериментов было использовано молоко 3,2 % жирности, искусственно загрязненное раствором, полученным из суспензии препарата «Лексофлон». Спектры возбуждения и люминесценции измерены на спектрофлуориметре CM2203. Выявлено 4 пика спектра возбуждения на длинах волн 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм. На данных пиках были измерены спектры люминесценции молока, которые при увеличении концентрации антибиотика количественно снижаются, некоторые из них имеют как однопиковую, так и многопиковую форму, также рассчитаны потоки люминесценции Φ_{290} , Φ_{324} , Φ_{360} , Φ_{445} . Излучение с длиной волны 290 нм целесообразно применять для полуколичественной диагностики антибиотика в молоке, а 445 нм для определения концентрации. Построена зависимость потока люминесценции Φ_{445} , о.е. от концентрации левофлоксацина в молоке C , мкг/см³ и аппроксимирована линейно с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,96$. На базе полученных результатов планируется разработать информационно-измерительный модуль бесконтактного определения наличия левофлоксацина, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока.

Ключевые слова: молоко, антибиотики, технические средства, оптический мониторинг, технологии.

Для цитирования: Самарин Г. Н., Беляков М. В., Ефременков И. Ю. Люминесцентная диагностика молока, загрязненного левофлоксацином // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 191-198. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-191-198

Luminescent diagnostics of milk contaminated with levofloxacin

G. N. Samarin[✉], M. V. Belyakov, I. Yu. Efremenkov

FSBEI Federal Scientific Agroengineering Center VIM

109428, Moscow, 1st Institutsky Ave., 5, Bldg. 1

[✉]samaringn@yandex.ru

Abstract. Milk containing antibiotics is technologically unacceptable in fermented milk products, as their presence either slows down fermentation or totally precludes it. If antibiotics concentrations are incorrectly determined and introduced into the food processing line, the entire batch of products may be unsuitable. Therefore, high-quality, affordable, rapid and timely testing for antibiotics in raw milk protects both the health of consumers and the economic stability of the processing enterprise. The objective of this study was to investigate the feasibility of photoluminescent specification of levofloxacin levels in milk. Milk with 3.2% fat content, artificially contaminated with a solution obtained from a suspension of "Lexoflon" medication, was used for the experiments. Excitation and luminescence spectra were measured on a CM2203 spectrofluorimeter. Four peaks of the excitation spectrum were revealed at wavelengths of 290 nm, 324 nm, 360 nm and 445 nm. The luminescence spectra of the milk were measured at these peaks; they quantitatively decrease with an increase in the concentration of the antibiotic, some of them having both single-peak and multi-peak shapes. The luminescence fluxes Φ_{290} , Φ_{324} , Φ_{360} and Φ_{445} were also calculated. Radiation with a wavelength of 290 nm is advisable to use for semi-quantitative diagnostics of the antibiotic in milk and 445 nm for determining the concentration. The dependence of the luminescence flux Φ_{445} , o.u. on the concentration of levofloxacin in milk C , $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ was determined and was approximated linearly with a specification coefficient of $R^2 = 0.96$. Based on the obtained results, it is planned to develop a contactless information and measurement module for levofloxacin detection, which can be integrated into milking and primary milk processing lines.

Keywords: milk, antibiotics, technical means, optical monitoring, technology.

For citation: Samarina G. N., Belyakov M. V., Efremenkova I. Yu. Luminescent diagnostics of milk contaminated with levofloxacin // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 191-198 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-191-198

Введение

Внедрение инновационных технологий в сферу АПК – необходимое условие для повышения качества и количества выпускаемой продукции [1]. Повышение доли автоматизации в молочном животноводстве способно существенно повысить эффективность производства [2]. Также важной задачей остается поддержание здоровья сельскохозяйственных животных, для этого необходимо применять качественные кормление и условия содержания, применение лекарственных препаратов в случае болезни. Однако, применение лекарственных препаратов, если не соблюдать условия их выведения из организма животного, может вызвать такую проблему, как попадание остаточного количества антибиотиков в молочное сырье, что в свою очередь может вызвать серьезные проблемы как для предприятий, занимающиеся переработкой, так и для потребителей такой продукции. Для человека постоянное употребление микродоз антибиотиков, получаемых с продуктов питания, может вызвать проблемы с ЖКТ или серьезное отравление [3]. С точки зрения практики контроль наличия антибиотиков в пищевом сырье является сложной задачей из-за трудностей методического характера, также отсутствуют как таковые научно обоснованные количественные нормы допустимого их содержания [4]. Поэтому для повышения эффективности диагностики антибиотиков в пищевых продуктах необходимо существенно увеличивать не только чувствительность существующих методов, но и внедрение новых, а также добавление дополнительных точек контроля, например, на этапе доения коров, при первичной переработке, при транспортировке молока на завод.

Проводили исследование, в котором остаточное количество антибиотиков в молоке обнаруживали с помощью биочиповой технологии [5]. Данные технологии обладают высокой чувствительностью, однако, недостатком является сравнительно большое время измерения, а именно около 15...20 минут и при внедрении данной технологии, например, на этапе доения, может существенно увеличить временные промежутки технологии переработки. Также имеются исследования по обнаружению антибиотиков тетрациклиновой группы в коровьем молоке с применением экспресс-тестов [6]. Однако, экспресс-тесты являются одноразовыми и при большом количестве измеряемых объектов становятся дорогостоящими.

Определение линкомицина в молоке с помощью металлоорганического каркасного адсорбента на основе меди и жидкостной хроматографии-тандемной масс-спектрометрии [7] удалось обнаружить антибиотик с пределом обнаружения 0,013 нг/мл, но внедрить методы масс-спектрометрии из-за специфики их работы и физических процессов в существующие технологии переработки достаточно сложно, а также финансово затратно.

Датчик QCM с молекулярным отпечатком на основе полога ZIF-67@PDA для обнаружения

спарфлоксацина показал высокую эффективность [8]. Чувствительность данного метода в определении антибиотиков составляла 0,03 мкг/мл, однако для синтеза молекулярно импринтированного полимера ZIF-67@PDA необходима сложная пробоподготовка, персонал с высшим образованием в области химии, что значительно увеличивает время и стоимость измерений.

Использовали флуоресцентное определение ципрофлоксацина и хлорамфеникола в образцах молока с помощью эффекта внутреннего фильтра и фотоиндуцированного переноса электронов на основе наноразмерных стержневидных Eu-MOF [9]. Недостаток флуоресцентных методов заключается в том, что для наблюдения и регистрации флуоресценции необходимо в образец вводить флуоресцирующее вещество, что усложняет пробоподготовку, также наноразмерная стержневая металл-органическая структура требует дополнительных затрат на ее изготовление, калибровку и т.д.

Лазерно-индуцированные графеновые электроды, модифицированные молекулярно-импринтированным полимером для обнаружения тетрациклина в молоке и мясе [10]. Для реализации данного метода необходимы графеновые электроды, модифицированные наночастицами золота, а также молекулярно-импринтированный полимер в качестве синтетического элемента биораспознавания, данные технические решения имеют сложную интеграцию в существующие процессы переработки молока.

Использование новых электрохимических датчиков для обнаружения тетрациклинов в молоке в режиме реального времени [11]. Осуществляли обнаружение антибиотиков пенициллиновой группы в молоке с помощью фотолюминесценции [12].

Цель исследования – изучение возможности фотолюминесцентного определения содержания левофлоксацина в молоке, на базе которых планируется разработать информационно-измерительный модуль наличия данного антибиотика.

Материалы и методы

Для измерений было взято молоко агрофирмы «Мичурино» (Мичуринский муниципальный округ Тамбовской области). Массовая доля жира составляет 3,2 %, дата разлива молока 05.12.24. До 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. Перед оптическими измерениями молоко тщательно перемешивали.

Для искусственного загрязнения молока сначала готовили стандартные растворы из суспензии «Лексофлон, 150 мг/мл», производитель: ООО «НитаФарм». Далее получали образцы молока объемом 100 см³ с концентрацией антибиотика 0,001 мкг/см³, 0,003 мкг/см³, 0,005 мкг/см³ и 0,010 мкг/см³.

Контрольное определение уровня антибиотиков осуществляли с помощью тест-наборов «BIOEASY 4in1

BSCT», основанных на иммунохроматографическом анализе с использованием коллоидного золота. Время анализа составляет 10 минут.

Измерения спектров возбуждения и люминесценции проводили на спектрофлуориметре SM2203 (производство фирмы «Солар», Белоруссия) со специализированным программным обеспечением. Спектрофлуориметр включает в себя оптическую систему с источником излучения – импульсной ксеноновой лампой и приемником излучения – фотоэлектронным умножителем. Лампа работает в режиме коротких световых импульсов. Для выделения необходимого спектрального диапазона применяется монохроматор с вогнутой дифракционной решеткой, работающей в первом порядке дифракции.

Осуществляли измерения спектральных характеристик возбуждения (поглощения) $\eta(\lambda)$. Измерения проводили в диапазоне от 230...600 нм по методике, аналогичной [13]. Чувствительность приёмника излучения была выставлена средней, шаг сканирования составлял 1 нм. Измерение спектров возбуждения проводили при синхронном сканировании, при котором монохроматоры каналов возбуждения и регистрации люминесценции перестраиваются одновременно со сдвигом 60 нм.

Для измерения спектра люминесценции $\phi(\lambda)$ 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 с использованием эталонных кювет.

По полученным спектральным характеристикам определяли интегральную поглощательную способность H по формуле:

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

$\eta(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения (поглощения) молока, выраженная в относительных единицах фотосигнала измерительного прибора (о. е.)

λ_1 - λ_2 – спектральные границы диапазона интегрирования по возбуждению.

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

$$\Phi = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \phi(\lambda) d\lambda' \quad (2)$$

$\phi(\lambda)$ – спектральная характеристика люминесцентного излучения,

λ_3 - λ_4 – спектральные границы диапазона интегрирования по люминесценции.

Результаты

Для обнаружения максимальной оптической поглощательной способности молока в видимом диапазоне спектра на первом этапе были получены спектральные характеристики возбуждения молока (рис. 1).

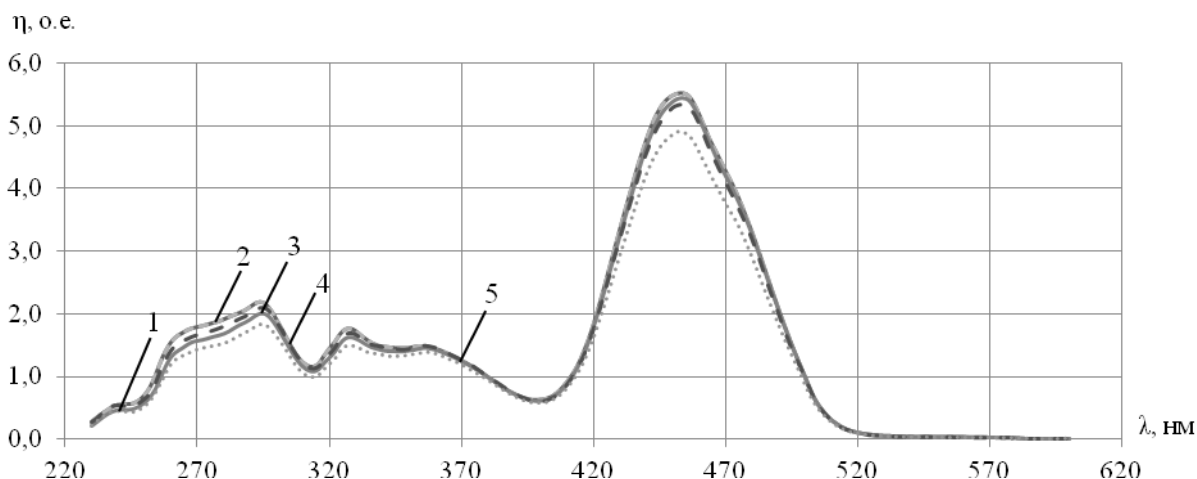


Рис. 1. Спектральные характеристики возбуждения молока с содержанием левофлоксацина: 1 – 0 мкг/см³, 2 – 0,001 мкг/см³, 3 – 0,003 мкг/см³, 4 – 0,005 мкг/см³, 5 – 0,010 мкг/см³

Молоко активно поглощает излучение в диапазоне 230...520 нм. К излучению в диапазоне 521...600 нм молоко не чувствительно. Также можно наблюдать 4 основных максимума на длинах волн: 290 нм, 324 нм, 360 нм, 445 нм, что подтверждает результаты, полученные авторами ранее [12]. От длины волны 230 нм до 290 нм поглощательная способность молока увеличивается до $\eta = 2,1$ о.е. С 291 нм до 310 нм, наблюдается снижение поглощения

излучения до $\eta = 1,1$ о.е. В диапазоне 310...400 нм максимум поглощения излучения несколько ниже и соответствует $\eta = 1,5$ о.е.

Наибольшая поглотительная способность приходится на диапазон длин волн от 420 нм до 490 нм, где максимум $\eta = 5,3$ о.е. Результаты расчетов интегральных параметров H по формуле (1) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Интегральные параметры спектров возбуждения молока, загрязненного левофлоксацином

Концентрация, мкг/см ³	Н, о.е. (для спектрального диапазона, нм)				
	230...310	310...340	340...400	400...520	230...600
0	114 ± 1	45 ± 1	70 ± 1	329 ± 1	561 ± 3
0,001	101 ± 8	42 ± 3	67 ± 5	322 ± 1	535 ± 32
0,003	101 ± 4	42 ± 1	68 ± 2	323 ± 3	536 ± 10
0,005	108 ± 4	43 ± 2	69 ± 3	316 ± 10	539 ± 21
0,010	92 ± 6	39 ± 2	65 ± 3	290 ± 5	489 ± 16

В спектральных диапазонах 230...310 нм, 340...400 нм, 400...520 нм при добавлении левофлоксацина в молоко наблюдается количественное изменение в интегральной поглотительной способности Н в меньшую сторону. При длинах волн 310...340 нм

существенных изменений Н не происходит. По полученным спектральным характеристикам возбуждения были измерены спектры люминесценции молока $\Phi(\lambda)$, (рис. 2).

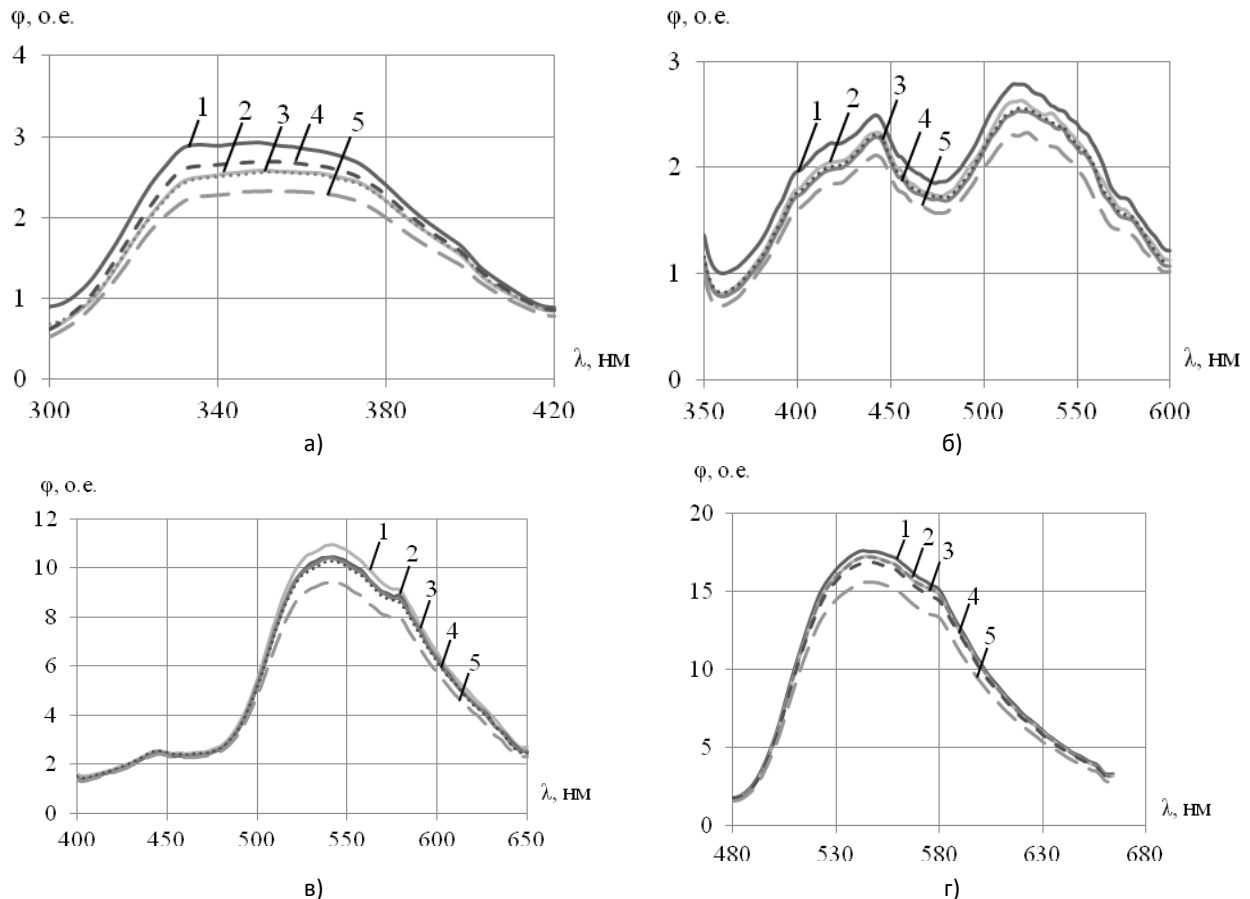


Рис. 2. Спектральные характеристики люминесценции молока при длинах волн возбуждения а) 290 нм, б) 324 нм, в) 360 нм, г) 445 нм при концентрации левофлоксацина: 1 – 0 мкг/см³, 2 – 0,001 мкг/см³, 3 – 0,003 мкг/см³, 4 – 0,005 мкг/см³, 5 – 0,010 мкг/см³

При длинах волн возбуждения 290 нм и 445 нм спектры люминесценции имеют одномодальную форму, при этом максимальная спектральная плотность потока люминесценции $\Phi_{\text{макс}}$ при $\lambda_{\text{в}} = 445$ больше и составляет 17,2 о.е., а при $\lambda_{\text{в}} = 290$ меньше и составляет $\Phi_{\text{макс}} = 2,9$ о.е.

У спектров при $\lambda_{\text{в}} = 324$ нм и $\lambda_{\text{в}} = 360$ нм отличительной особенностью является двумодальность, причем при $\lambda_{\text{в}} = 360$ нм – ярко выраженная.

При длине волны возбуждения 360 нм, первый максимум находится на 446 нм и имеет спектральную плотность потока люминесценции $\Phi = 2,38$ о.е., второй максимум находится на длине волны 540 нм

и имеет $\Phi_{\text{макс}}$ от 9,46 о.е. до 18,82 о.е. в зависимости от концентрации антибиотика в молоке, что в 4...5 раз больше по сравнению с первым максимумом. При $\lambda_{\text{в}} = 324$ нм максимумы спектрального потока люминесценции примерно равны и составляют от $\Phi = 2,1$ о.е. до 2,5 о.е. для длины волны 444 нм и от $\Phi = 2,3$ о.е. до 2,6 о.е. для $\lambda = 518$ нм в зависимости от содержания левофлоксацина, т.е. отличие в максимумах составляет около 4 %.

Результаты расчетов интегральных параметров Φ (в относительных единицах) и их погрешности для надежности $p=0,95$ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Интегральные параметры спектров люминесценции молока, загрязненного левофлоксацином

Концентрация, мкг/см ³	Φ ₂₉₀ , о. е.	Φ ₃₂₄ , о. е.	Φ ₃₆₀ , о. е.	Φ ₄₄₅ , о. е.
0	254 ± 3	498 ± 7	1391 ± 14	1901 ± 11
0,001	225 ± 24	462 ± 42	1333 ± 107	1865 ± 128
0,003	224 ± 12	454 ± 13	1332 ± 26	1860 ± 27
0,005	232 ± 15	460 ± 31	1320 ± 73	1817 ± 80
0,010	204 ± 16	413 ± 21	1216 ± 45	1682 ± 47

Относительная погрешность определения потоков фотолюминесценции незагрязненного молока сравнительно невелика – 0,6...1,4 %, но она в разы возрастает при введении антибиотиков (табл. 2). При этом наибольшая относительная погрешность для концентрации $C=0,001$ мкг/см³. Это можно объяснить недостаточным уровнем концентрации для взаимодействия с составными частицами молока и изменением их люминесцентных свойств (концентрационное тушение люминесценции). Как следствие, люминесцируют как частицы, прореагировавшие с антибиотиками, так и непрореагировавшие, т. е. скорее всего, имеет место некое «пограничное состояние» взаимодействия излучения молока и антибиотиков.

Для длины возбуждения 445 нм относительная погрешность определения потока наименьшая и не

превышает 6,9 %, что можно объяснить самым большим уровнем фотосигнала. Для коротковолнового возбуждения 290 нм – наоборот, относительная погрешность наибольшая, а абсолютная – наименьшая.

Из табл. 2 следует, что потоки Φ₂₉₀, Φ₃₂₄, Φ₃₆₀, Φ₄₄₅ уменьшаются с повышением концентрации антибиотиков в молоке. Однако для контроля наличия левофлоксацина предпочтительнее использовать поток люминесценции Φ₂₉₀, поскольку не происходит наложения доверительных интервалов потоков при концентрации антибиотика 0 мкг/см³ и 0,001 мкг/см³. Потоки люминесценции Φ₃₂₄, Φ₃₆₀, Φ₄₄₅ также можно применять для отслеживания концентрации антибиотиков, но в тех случаях, где не нужна высокая точность при измерениях. Полученные зависимости Φ(C) представлены на рис. 3.

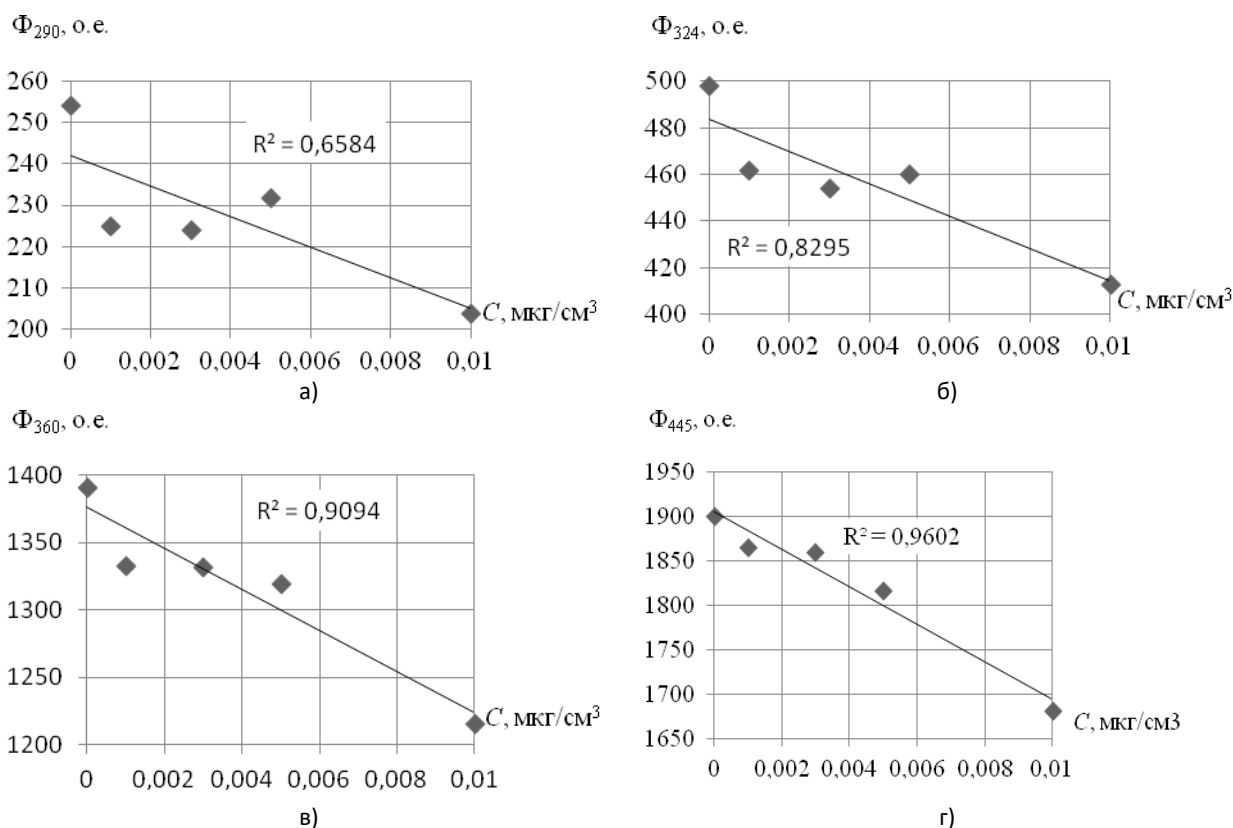


Рис. 3. Графики зависимости потоков люминесценции от концентрации антибиотиков в молоке при длине волны возбуждения: а) – 290 нм, б) – 324 нм, в) – 360 нм, г) – 445 нм

На основе полученных результатов может быть разработан информационно-измерительный модуль (ИИМ) количественного или полуколичественного содержания левофлоксацина в молоке. Варианты интеграции ИИМ в поточно-технологические линии (ПТЛ) могут быть разнообразны.

Например, на рис. 4 представлен один из вариантов типовой ПТЛ доения коров и первичной обработки молока в коровнике на 400 голов (1) с доильным залом (3), который широко распространен в России и за рубежом [14-16]. ПТЛ первичной обработки молока представлена в стандартном исполнении: сбор (14), учет, очистка (10), охлаждение (9) и хранение молока (8), с последующей выгрузкой (7) его в

автоцистерну (6). Места установки ИИМ (5) выбраны не случайно, так как позволяют оперативно отсекают молоко, загрязнённое антибиотиками, из общего потока при помощи трехходового крана с исполнительным механизмом (13); контролировать наличие антибиотиков в молоке при сдаче молока на ферме и при приемке молока в автоцистерну.

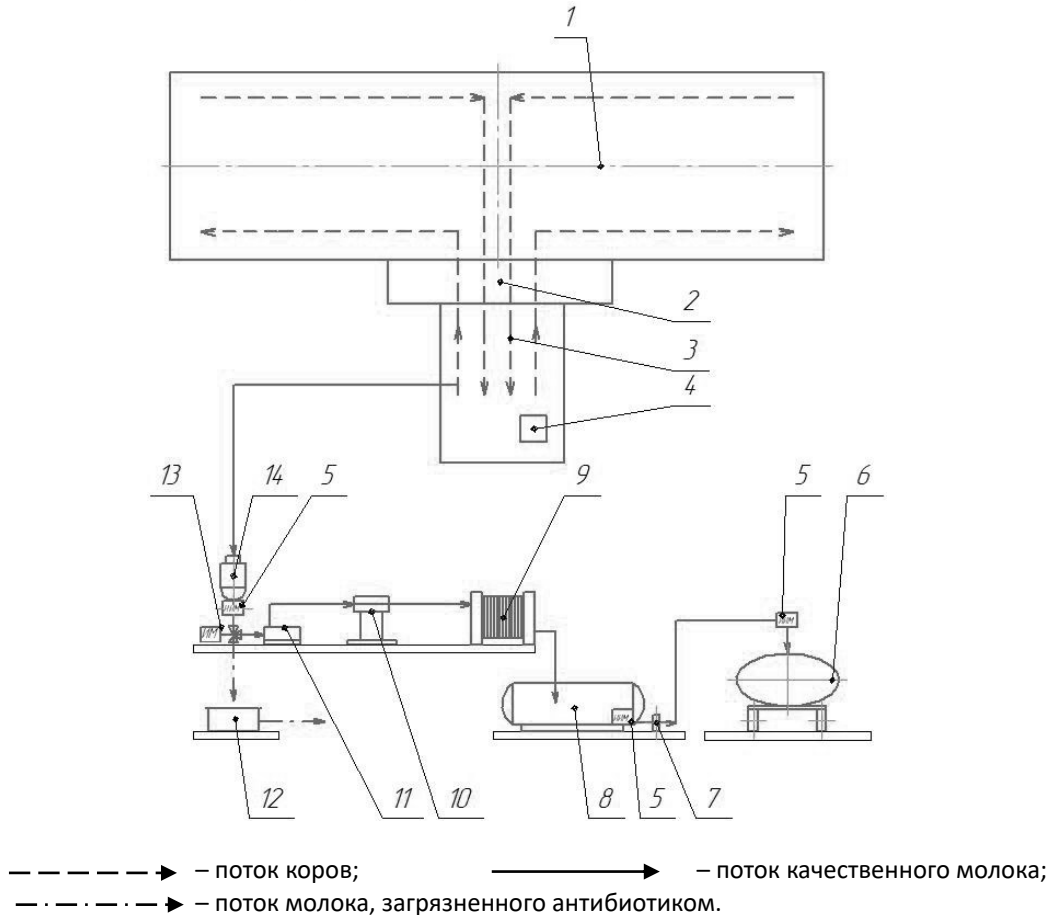


Рис. 4. Технологическая схема поточно-технологическая линия доения коров и первичной обработки молока: 1 – коровник на 400 голов; 2 – площадка преддоильная; 3 – доильный зал с доильной установкой; 4 – установка вакуумная; 5 – информационно-измерительный модуль; 6 – автоцистерна; 7 – насос молочный; 8 – резервуар-охладитель молока; 9 – охладитель молока пластинчатый; 10 – сепаратор-молокоочиститель; 11 – насос молочный; 12 – емкость для загрязненного молока; 13 – трехходовой кран с исполнительным механизмом; 14 – молокосорбник.

Обсуждение

Полученные спектры (рис. 1) объясняются мультикомпонентностью молока, которое в своем составе имеет белки, жиры, углеводы, макро- и микронутриенты. Максимум возбуждения при 290 нм может быть обусловлен присутствием триптофана [17]. Наличие пика при 324 нм может свидетельствовать о возбуждении пуриновых и пиримидиновых оснований, входящих в состав нуклеиновых кислот. Присутствие данных соединений в молоке обусловлено его белковым составом и клеточными элементами (ДНК, РНК), также данный максимум является флуоресценцией витамина А [18]. Пик 360 нм может быть связан с наличием в молоке нуклеотидов, белков и флавоноидов [19]. Пик

445 нм может характеризовать присутствие рибофлавина, а именно витамина В2 в молоке [20].

Графики зависимостей потока люминесценции молока от концентрации (рис. 3) имеют нисходящий тренд при увеличении содержания левофлоксацина в молоке. Следовательно, для регистрации факта наличия левофлоксацина минимальной концентрации (0,001 мкг/см³) целесообразнее использовать возбуждение излучением 290 нм, т.е. применять полуколичественный анализ для разработки сигнализатора с наименьшей абсолютной погрешностью определения потока Φ_{290} . Более длинноволновое возбуждение 360 нм и, особенно, 445 нм следует применять для разработки методики и датчика фотолюминесцентного определения концентрации антибиотиков, где

регистрация минимальных концентраций антибиотиков не критична, но важно понимать, сколько антибиотиков в молоке. Возбуждение излучением 445 нм наиболее предпочтительно ввиду самого высокого фотосигнала, наименьшей относительной погрешности определения потока и наибольшей статистической достоверности линейной аппроксимации зависимости $\Phi_{445}(C)$, имеющей коэффициент детерминации 0,96. Уравнение регрессии для обратной зависимости $C(\Phi_{445})$:

$$C = -21099 \cdot \Phi_{445} + 1905,2 \quad (3)$$

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что результаты могут быть использованы для создания информационно-измерительного модуля, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока. Оптический принцип работы информационно-измерительного модуля соответствует передовым научно-исследовательским разработкам в области оптической техники и не имеет аналогов в мире.

Заключение

Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции чистого молока и молока, загрязненного левофлоксацином, имеют количественные различия, особенно при возбуждении излучением 290 нм и 445 нм. При увеличении концентрации антибиотиков снижаются потоки фотолюминесценции для всех исследованных длин волн возбуждения и увеличивается погрешность их определения. Ультрафиолетовое возбуждение 290 нм целесообразно использовать для полуколичественного определения наличия левофлоксацина в молоке, а возбуждение синим излучением 445 нм – для определения концентрации. Зависимость $\Phi_{445}(C)$ может быть статистически достоверно аппроксимирована линейной функцией и положена в основу разработки фотолюминесцентного датчика концентрации антибиотиков в молоке. Результаты могут быть использованы для создания информационно-измерительного модуля, встраиваемого в поточно-технологические линии доения коров и первичной обработки молока.

Литература

1. Необходимость внедрения инновационных технологий в молочном животноводстве / Ф. Ф. Ситдииков, Б. Г. Эиганшин, Р. Р. Шайдуллин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. № 4. С. 69-74. doi: 10.12737/2073-0462-2020-69-74

2. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. № 4. С. 6-10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10

3. Проблемы контроля и методы обнаружения остаточного количества антибактериальных веществ в молоке и молочной продукции / Г. М. Горяинова, Е. А. Денисова Л. В. Арсеньева и др. // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2020. № 2. С. 165-169. doi: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202002007

4. Свириденко Г. М. Проблемы организации системного контроля антибиотиков в молоке и молочных продуктах // Молочная промышленность. 2020. № 8. С. 8-12. doi: 10.31515/1019-8946-2020-08-8-12

5. Попов П. А. Обнаружение остаточных концентраций антибиотиков в молоке с помощью биочиповой технологии // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2020. № 3 (35). С. 304-312. doi: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202003004

6. Абдусаломова Д. О., Азизов О. Т. Определение остаточных количеств антибиотиков тетрациклиновой группы в коровьем молоке с применением экспресс-тестов // Universum: технические науки. 2024. № 3-4 (120). С. 40-44. doi: 10.32743/UniTech.2024.120.3.17047

7. Determination of Lincomycin in Milk Using Cu-Based Metal-Organic Framework Adsorbent and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. / H. Li, J. Wu, J. Bai, et al. // Molecules. 2023. Vol. 28(14). P. 5307. doi: 10.3390/molecules28145307

8. Molecularly Imprinted QCM Sensor Based on Hollow ZIF-67@PDA for Sparfloxacin Detection. / S. Liao, L. Wang, C. Chen, et al. // Electronics. 2024. Vol. 13(23). P. 4799. doi: 10.3390/electronics13234799

9. Fluorescent Sensing of Ciprofloxacin and Chloramphenicol in Milk Samples via Inner Filter Effect and Photoinduced Electron Transfer Based on Nanosized Rod-Shaped Eu-MOF. / X. Yue, C. Wu, Z. Zhou, et al. // Foods. 2022. Vol. 11(19). P. 3138. doi: 10.3390/foods11193138

10. Laser-Induced Graphene Electrodes Modified with a Molecularly Imprinted Polymer for Detection of Tetracycline in Milk and Meat / B. D. Abera, I. Ortiz-Gomez, B. Shkodra, et al. // Sensors. 2022. Vol. 22(1). P. 269. doi: 10.3390/s22010269

11. Emerging Electrochemical Sensors for Real-Time Detection of Tetracyclines in Milk. / M. R. Raykova, A. C. Ward, D.K. Corrigan, et al. // Biosensors. 2021. Vol. 11(7). doi: 10.3390/bios11070232

12. Обнаружение антибиотиков в молоке по его фотолюминесцентным свойствам / Г. Н. Самарин, М. В. Беляков, И. Ю. Ефременков и др. // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. № 1. С. 10-16. doi: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16

13. Control of milk acidity by photoluminescence / A. S. Dorokhov, G. N. Samarina, A. S. Kudryavtsev, et al. // International Journal of Food Science and Technology. 2023. Vol. 58(1). doi: 10.1111/ijfs.16195

14. Коршунов А. Б. Повышение эффективности первичной обработки молока на фермах // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 2. С. 34-40. doi:10.26897/2687-1149-2022-2-34-40

15. Кирсанов В. В. Направления развития искусственного интеллекта в биомашинных системах для животноводства // Агроинженерия. 2025. Т. 27. № 3. С. 15-22. doi:10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

16. Мохов Б. П., Наумова В. В. Влияние среды и наследственности на реализацию потенциала мясной продуктивности крупного рогатого скота // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной

академии. 2025. №2 (70). С. 173-180. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-173-180

17. The effect of heat treatment on the front-face fluorescence spectrum of tryptophan in skim milk / N. Ayala, A. Zamora, A. Rinnan, et al. // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 92. P. 103. doi: 10.1016/j.jfca.2020.103569.

18. Kamal M., Karoui R. Monitoring of mild heat treatment of camel milk by front-face fluorescence spectroscopy // *Food Science and Technology*. 2017. Vol. 79. P. 586–593. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.013

19. Структурные группы природных фосфолипидов, участвующие в образовании комплексов с флавоноидами / Л. Н. Шишкина, М.В. Козлов, Т. В. Константинова и др. // *Химическая физика*. 2023. Т. 42. № 1. С. 28–34. doi: 10.31857/S0207401X23010107

20. Термодеструкция рибофлавина в различных агрегатных состояниях / С. Астанов, М. З. Шарипов, А. Р. Файзуллаев и др. // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81. № 1. С. 40–45.

References

1. The need to implement innovative technologies in dairy farming / F. F. Sitdikov, B. G. Eiganshin, R. R. Shaidullin, et al. // *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. No. 4. P. 69-74. doi: 10.12737/2073-0462-2020-69-74

2. Lobachevsky Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic technical means for agriculture // *Farm Machinery and Technologies*. 2021. No. 4. P. 6-10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10

3. Problems of control and methods for detecting residual amounts of antibacterial substances in milk and dairy products / G. M. Goryainova, E. A. Denisova, L. V. Arsenyeva, et al. // *Russian Journal of Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2020. No. 2. P. 165-169. doi: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202002007

4. Sviridenko G. M. Problems of organization of systematic control of antibiotics in milk and dairy products // *Dairy Industry*. 2020. No. 8. P. 8-12. doi: 10.31515/1019-8946-2020-08-8-12

5. Popov P. A. Detection of residual concentrations of antibiotics in milk using biochip technology // *Russian Journal of Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2020. No. 3 (35). P. 304-312. doi: 10.36871/vet.san.hyг.ecol.202003004

6. Abdusalomova D. O., Azizov O. T. Specification of residual quantities of tetracycline antibiotics in milk of cows using rapid tests // *Universum: technical sciences*. 2024. No. 3-4 (120). P. 40-44. doi: 10.32743/UniTech.2024.120.3.17047.

7. Determination of Lincomycin in Milk Using Cu-Based Metal-Organic Framework Adsorbent and Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry. / H. Li, J. Wu, J. Bai, et al. // *Molecules*. 2023. Vol. 28 (14). P. 5307. doi: 10.3390/molecules28145307

8. Molecularly Imprinted QCM Sensor Based on Hollow ZIF-67@PDA for Sparfloxacin Detection. / S. Liao, L. Wang,

C. Chen, et al. // *Electronics*. 2024. Vol. 13(23). P. 4799. doi: 10.3390/electronics13234799

9. Fluorescent Sensing of Ciprofloxacin and Chloramphenicol in Milk Samples via Inner Filter Effect and Photoinduced Electron Transfer Based on Nanosized Rod-Shaped Eu-MOF. / X. Yue, C. Wu, Z. Zhou, et al. // *Foods*. 2022. Vol. 11(19). P. 3138. doi: 10.3390/foods11193138

10. Laser-Induced Graphene Electrodes Modified with a Molecularly Imprinted Polymer for Detection of Tetracycline in Milk and Meat / B. D. Abera, I. Ortiz-Gomez, B. Shkodra, et al. // *Sensors*. 2022. Vol. 22(1). P. 269. doi: 10.3390/s22010269

11. Emerging Electrochemical Sensors for Real-Time Detection of Tetracyclines in Milk. / M. R. Raykova, A. C. Ward, D.K. Corrigan, et al. // *Biosensors*. 2021. Vol. 11(7). doi: 10.3390/bios11070232

12. Detection of antibiotics in milk by its photoluminescent properties / G. N. Samarin, M. V. Belyakov, I. Yu. Efremenko, et al. // *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2024. No. 1. P. 10-16. doi: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-10-16

13. Control of milk acidity by photoluminescence / A. S. Dorokhov, G. N. Samarin, A. S. Kudryavtsev, et al. // *International Journal of Food Science and Technology*. 2023. Vol. 58(1). doi: 10.1111/ijfs.16195

14. Korshunov A. B. Improvement of the efficiency of primary milk processing on farms // *Agroengineering*. 2022. Vol. 24. No. 2. P. 34-40. doi:10.26897/2687-1149-2022-2-34-40

15. Kirsanov V. V. Directions for development of Artificial Intelligence in biomachine systems for animal husbandry // *Agroengineering*. 2025. Vol. 27. No. 3. P. 15-22. doi:10.26897/2687-1149-2025-3-15-22

16. Mokhov B. P., Naumova V. V. The Influence of environment and heredity on the realization of the potential of meat productivity of cattle // *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2025. No. 2 (70). P. 173-180. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-173-180

17. The effect of heat treatment on the front-face fluorescence spectrum of tryptophan in skim milk / N. Ayala, A. Zamora, A. Rinnan, et al. // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020. Vol. 92. P. 103. doi: 10.1016/j.jfca.2020.103569.

18. Monitoring of mild heat treatment of camel milk by front-face fluorescence spectroscopy / M. Kamal, R. Karoui // *Food Science and Technology*. 2017. Vol. 79. P. 586-593. doi: 10.1016/j.lwt.2016.11.013.

19. Structural groups of natural phospholipids involved in formation of complexes with flavonoids / L. N. Shishkina, M. V. Kozlov, T. V. Konstantinova, et al. // *Chemical Physics*. 2023. Vol. 42. No. 1. P. 28-34. doi: 10.31857/S0207401X23010107

20. Thermal destruction of riboflavin in various states of aggregation / S. Aстанов, M. Z. Sharipov, A. R. Fayzullaev, et al. // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2014. Vol. 81. No. 1. P. 40-45.