

Научная статья/Research Article

УДК 535.372:631.363

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-70-82

**Михаил Владимирович Беляков<sup>1✉</sup>, Денис Сергеевич Пятченков<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия<sup>1</sup>bmw20100@mail.ru<sup>2</sup>denis.piat@yandex.ru**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА РАЗМОЛОТОГО ФУРАЖНОГО ЗЕРНА  
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ СОДЕРЖАНИЯ ЖИРОВ**

*Цель исследований – определение информативных параметров фотолюминесценции фуражного зерна пшеницы, овса и ячменя для контроля содержания в них жиров. Исследования проводились в 2024 г. на базе Федерального научного агроинженерного центра «ВИМ» в лаборатории «Инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве». Для подготовки образцов зерна культур предварительно измельчались при помощи лабораторной мельницы. В измельченных образцах варьирование жира проводилось при помощи орошения образцов растительными маслами. Содержание жира контролировалось при помощи инфракрасного анализатора кормов FOSS NIRS DS2500. Измерение спектральных характеристик люминесценции измерялось при помощи спектрофлуориметра CM 2203. Изначально измерялись характеристики возбуждения (поглощения), на основании максимумов которых измерялись спектры фотолюминесценции. Рассчитаны интегральные параметры возбуждения и фотолюминесценции, а также статистические параметры спектров возбуждения кормов. При увеличении концентрации жира в размолотом зерне его люминесцентная способность снижается, что объясняется концентрационным тушением. Качественные статистические параметры возбуждения (поглощения) меняются сравнительно слабо и несистемно, поэтому наиболее информативными являются потоки фотолюминесценции при возбуждении излучением 282/290 нм, 362 и 414/424 нм. Зависимости интегральных потоков фотолюминесценции от концентрации жира для всех исследованных размолотых зерен статистически достоверно могут быть аппроксимированы линейными функциями. При этом коэффициенты детерминации для пшеницы – 0,971–0,987, для овса – 0,943–0,995, для ячменя – 0,852–0,984. Для разработки метода и создания универсального прибора контроля содержания жира в зерновых кормах наиболее целесообразным является использование потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 362 нм.*

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, концентрация жира в зерне, пшеница, овес, ячмень, спектр излучения, поток фотолюминесценции, статистические параметры

**Для цитирования:** Беляков М.В., Пятченков Д.С. Люминесцентные свойства размолотого фуражного зерна при варьировании содержания жиров // Вестник КрасГАУ. 2025. № 11. С. 70–82. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-70-82.

**Mikhail Vladimirovich Belyakov<sup>1✉</sup>, Denis Sergeevich Pyatchenkov<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia<sup>1</sup>bmw20100@mail.ru<sup>2</sup>denis.piat@yandex.ru**LUMINESCENCE PROPERTIES OF GROUND FEED GRAIN WITH VARYING FAT CONTENT**

*The objective of the study is to determine informative photoluminescence parameters of wheat, oat, and barley feed grains to monitor their fat content. The studies were conducted in 2024 at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM in the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means*

of Feeding in Animal Husbandry. To prepare the samples, the grains were pre-ground using a laboratory mill. Fat content in the ground samples was varied by irrigating them with vegetable oils. Fat content was monitored using a FOSS NIRS DS2500 infrared feed analyzer. Spectral luminescence characteristics were measured using a CM 2203 spectrofluorimeter. Initially, excitation (absorption) characteristics were measured, and the maxima of these were used to determine the photoluminescence spectra. Integral excitation and photoluminescence parameters, as well as statistical parameters of the excitation spectra of the feed, were calculated. As the fat concentration in milled grain increases, its luminescent capacity decreases, which is explained by concentration quenching. The qualitative statistical parameters of excitation (absorption) change relatively weakly and non-systematically; therefore, the most informative photoluminescence fluxes are those excited by radiation at 282/290 nm, 362 nm, and 414/424 nm. The dependences of the integral photoluminescence fluxes on the fat concentration for all studied grain millings can be statistically reliably approximated by linear functions. Moreover, the determination coefficients for wheat are 0.971–0.987, for oats – 0.943–0.995, and for barley – 0.852–0.984. For the development of a method and the creation of a universal device for monitoring the fat content in grain feed, the use of photoluminescence fluxes excited by radiation at 362 nm is most appropriate.

**Keywords:** photoluminescence, grain fat concentration, wheat, oats, barley, emission spectrum, photoluminescence flux, statistical parameters

**For citation:** Belyakov MV, Pyatchenkov DS. Luminescence properties of ground feed grain with varying fat content. *Bulletin of KSAU*. 2025;(11):70-82. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-70-82.

**Введение.** Цифровые технологии активно разрабатываются и внедряются в сельском хозяйстве, в том числе для повышения эффективности кормопроизводства и животноводства [1]. Одним из направлений увеличения объема и повышения качества животноводческой продукции является контроль питательной ценности кормов [2]. Он необходим для оптимизации рационов, повышения продуктивности животных и их здоровья. Низкая питательная ценность основных кормов вызывает необходимость в балансировке рационов за счет добавления концентрированных кормов, что экономически невыгодно, а излишнее добавление концентратов ведет к различным нарушениям в обмене веществ [3]. Высокая продуктивность животных тесно связывается с прочной кормовой базой, которая обеспечивает животных полноценными рационами, содержащими необходимый набор питательных веществ [4].

Фуражное зерно широко используется в кормлении сельскохозяйственных животных – птицы и скота и занимает значительную долю в кормлении – 20–80 %, в зависимости от вида животного. Оно обладает высокими питательными свойствами и содержит в себе необходимые микро- и макроэлементы, необходимые для полноценного развития и поддержания жизнедеятельности животных [5], а включение зерновых в состав комбикормов с целью балансировки по основным компонентам кормления на сегодняшний день является одной из главных возможностей повышения продуктивности жи-

вотных одновременно с сокращением расхода кормов [6].

Применение цельного зерна пшеницы, ячменя и овса вместо части комбикорма для кур способствует высоким зоотехническим показателям при выращивании молодняка и содержании взрослых птиц, при этом лучшая продуктивность отмечена при скормливании овса и пшеницы [7]. Зерновые культуры являются важным компонентом рациона жвачных животных. За счет содержания в них крахмала, который обеспечивает высокую плотность энергии, включение в рацион крупного рогатого скота зерновых культур поддерживает высокую производительность молока и быстрые темпы роста животного [8].

Содержание жира – ключевой показатель питательной ценности кормов. Жиры располагаются на мембранных структурах клеток, и занимают важное место среди энергетических веществ и являются обязательным элементом кормового рациона и одним из важнейших источников энергии. Они участвуют в процессах регулирования обмена веществ, сохранения энергии, переноса витаминов, гормонов, а также являются источниками незаменимых жирных кислот [9], основой для последующего синтеза биологически активных веществ, могут улучшать физические свойства и вкусовые качества корма [10]. Недостаточное или же, наоборот, избыточное количество жиров может вызывать негативные последствия для живых организмов.

Улучшение кормового рациона и использование дополнительных кормов способствуют

повышению продуктивности коз [11]. Добавление масла в корм генетически улучшенных бройлеров необходимо для удовлетворения энергетических потребностей, а также для улучшения метаболизма, показателей роста [12] и иммунного ответа [13]. Корма с растительными маслами потенциально могут быть интегрированы в практику аквакультуры [14], что позволит решить проблему удовлетворения потребности рыб в питательных веществах [15].

Обеспечение коров более полноценным и сбалансированным рационом может повысить их устойчивость к болезням и снизить их заболеваемость. Изучение свойств кормов, в том числе определение содержания жиров, также способствуют формированию теоретической базы для составления рациона для крупного рогатого скота [16], разработке новых кормов из некоторых видов биомассы [17].

Традиционными методами определения жира в кормах являются методы «мокрой химии». Достаточно часто применяется экстракционно-гравиметрический метод Сокслета [18, 19], где навеску хорошо измельчают и помещают в бумажный патрон, прикрывая ватой, после чего патрон помещают в экстрактор, где в колбе кипятят эфир, пары которого преодолевают холодильник, и уже жидкий эфир попадает в патрон, эфир при этом извлекает жир и впоследствии удаляется испарением [20]. При массовых анализах применяется метод Рушковского, основанный на определении сырого жира по количеству обезжиренного остатка и позволяющий проводить исследования одновременно нескольких видов кормов в экстракторе аппарата Сокслета или Еременко [21].

Для экстракции и контроля содержания жира также применяются: метод микроволновой экстракции, заключающийся в воздействии на продукты микроволновым излучением, под воздействием которого фракция разделяется на липиды и растворитель; метод сверхкритической флюидной экстракции, основывающийся на том, что образец подвергается небольшому нагреванию в камере под давлением, после чего смешивают со сверхкритической жидкостью  $\text{CO}_2$ , который извлекает липидную фракцию и удаляется; метод ультразвуковой экстракции, где измельченный образец помещают в колбу и смешивают с растворителем, после чего колбу помещают в ультразвуковую ванну для выделения липидной фракции [22].

Альтернативой описанным методам анализа являются методы, основанные на взаимодействии образца с оптическим излучением, – оптические спектральные: флуоресцентная спектроскопия (измерение спектров флуоресценции), рамановская (измерение спектров комбинационного рассеяния), абсорбционная (измерение спектров поглощения), отражательная (измерение спектров отражения излучения от образца) и неспектральные: рефрактометрия (исследование распространения излучения в среде), поляриметрия (исследование параметров поляризации излучения), рефлектометрия (исследование френелевского отражения), методы анализа кормов. Эти методы селективные, прецизионные, дистанционные, неразрушающие, экспрессные, не требуют расходных материалов и наличия высококвалифицированных специалистов. Распространены методы инфракрасной спектроскопии в спектральном диапазоне 800–1200 нм [23], использующие для измерения массовой доли жира характерную полосу поглощения углерод-водородных связей [24]. Примерами таких коммерческих лабораторных и переносных приборов являются FOSS NIRS DS2500 (Дания), ИнфраЛИОМ (Россия), X-NIR (Италия) и многие другие. Недостатки многих таких приборов заключаются в сравнительно больших массогабаритных показателях (даже у переносных, таких как X-NIR) и высокой стоимости. В связи с этим становится важным создание сравнительно недорогого компактного анализатора кормов, способного экспрессно измерять большинство их параметров качества. Такой прибор может быть разработан на основе оптического фотолюминесцентного метода.

**Цель исследования** – определение информативных параметров фотолюминесценции фуражного зерна пшеницы, овса и ячменя для контроля содержания в них жиров.

**Задачи:** выявить наиболее информативные спектры люминесценции зерна, провести расчет потоков люминесценции, определить влияние варьирования жира образцов на поток люминесценции.

**Объекты и методы.** Для исследований были использованы образцы фуражного зерна пшеницы, овса и ячменя. Образцы были размолоты с помощью измельчителя ЛЗМ-1м в течение одной минуты до среднего размера помола не более 2,5 мм согласно условиям ГОСТ 8770-Комбикорм. Величину модуля помола находили

методом ситового анализа на эталонных ситах с диаметрами отверстий 0,45 мм, 0,7, 1, 1,6, 2,4, 2,8 мм. Определение концентрации жира  $C_F$  в образцах осуществляли на приборе FOSS NIRS DS2500. Содержание жира изменяли путем мелкодисперсного распыления растительного масла в исследуемый размол с параллельным контролем массы на аналитических весах и последующей герметизацией образца на одни сутки.

Спектры возбуждения (эффективного поглощения) и фотолюминесценции измеряли дифракционным спектрофлуориметром CM2203 (SOLAR, Белоруссия) с внешней светозащитной камерой по методике [25]. Спектрофлуориметр включает оптическую систему с импульсной ксеноновой лампой в качестве источника излучения и фотозлектронным умножителем в качестве приемника излучения. Лампа работает в режиме коротких импульсов длительностью 1,5 мкс и частотой 25 Гц. Для выделения необходимого спектрального диапазона использовался монохроматор с вогнутой дифракционной решеткой, работающий в первом порядке дифракции. На начальном этапе проводили синхронное сканирование монохроматорами для получения спектров возбуждения  $\eta(\lambda)$  для расширенного интервала длин волн от 230 до 600 нм. На следующем этапе находили наиболее значимые пики возбуждения  $\lambda_b$ . Установив монохроматор возбуждения на длины волн  $\lambda_b$ , проводили сканирование спектров фотолюминесцентного излучения  $\varphi(\lambda)$ . Шаг сканирования спектров составлял 2 нм, чувствительность фотозлектронного умножителя – средняя. Полученные характеристики обрабатывали на инструментальные искажения с помощью программного обеспечения «Microcal Origin». Повторность спектральных измерений для каждого исследуемого образца – двадцатикратная. По результатам спектральных измерений рассчитали интегральные параметры, являющиеся относительными потоками фотолюминесценции  $\Phi_\lambda$  для каждой длины волны  $\lambda_b$ . В программе Microcal Origin были рассчитаны статистические параметры спектров: математическое ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесса.

Математическое ожидание  $M_\lambda$  (в нанометрах) для непрерывного спектрального распределения определяется интегрированием по плотности распределения

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

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – наименьшее и наибольшее значение длин волн спектра возбуждения (поглощения).

Дисперсия  $\sigma^2$  как **статистический показатель, который характеризует разброс значений в выборке или совокупности**, находится по формуле

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

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статический момент 3-го порядка  $\mu_3$

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

Более распространенным параметром оценки асимметричности спектрального распределения является асимметрия  $As$ , определяемая из соотношения

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (4)$$

Асимметрия может быть правосторонней ( $As > 0$ ) либо левосторонней ( $As < 0$ ).

Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статического момента 4-го порядка  $\mu_4$

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Для анализа крутизны используют эксцесс  $E_\lambda$

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (6)$$

**Результаты и их обсуждение.** В качестве примера на рисунке 1 представлены спектры поглощения  $\eta(\lambda)$  при синхронном сканировании размолотов пшеницы разной жирности.

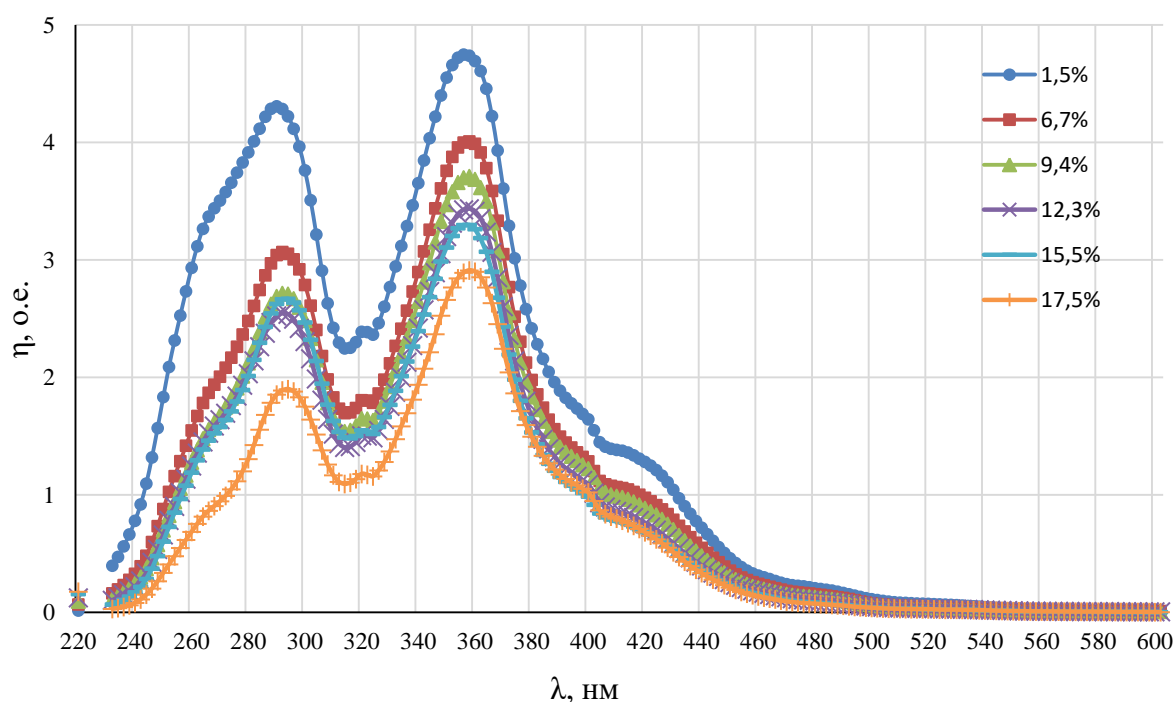


Рис. 1. Спектры поглощения фуражного зерна пшеницы с различным содержанием жиров  
Absorption spectra of feed grain of wheat with different fat content

Спектры возбуждения (поглощения) находятся в диапазоне 230–450 нм. Для размолотых пшеницы характеристики  $\eta(\lambda)$  содержат наибольшие максимумы на длинах волн около 290 и 362 нм и сравнительно небольшой максимум примерно на 414 нм. С ростом концентрации жира характеристики смещаются вниз, т. е. уменьшаются поглощательная и, как следствие, излучательная способности. Это может быть вызвано концентрационным тушением люминесценции.

Для размолотых овса и ячменя в спектрах поглощения содержатся максимумы на длинах волн 282 нм, 362 и 424 нм. Два более длинно-

волновых максимума характерны для целых неразмолотых зерен [26]. Наличие поглощения на 362 нм связывают с фенольной кислотой. Более длинноволновое поглощение ( $\lambda_b = 424$  нм) может быть вызвано наличием рибофлавина, каротиноидов, а также суперпозицией спектров излучения терпеноидов, спорополленина, липофусцина [27].

Для оценки качественных изменений спектров поглощения размолотых зерна пшеницы, овса и ячменя рассчитали статистические параметры и представили их в таблице 1.

Таблица 1

Статистические параметры размолотых пшеницы, овса и ячменя при варьировании жирности  
Statistical parameters of wheat, oat and barley grindings with varying fat content

| $C_F, \%$ | $M_\lambda, \text{нм}$ | $\sigma^2$ | $A_s$ | $E_x$ |
|-----------|------------------------|------------|-------|-------|
| 1         | 2                      | 3          | 4     | 5     |
| Пшеница   |                        |            |       |       |
| 1,5       | 332                    | 3182       | 0,596 | 0,350 |
| 6,7       | 338                    | 2923       | 0,533 | 0,467 |
| 9,4       | 339                    | 2794       | 0,477 | 0,379 |
| 12,3      | 337                    | 2704       | 0,455 | 0,321 |
| 15,5      | 336                    | 2574       | 0,488 | 0,334 |
| 17,5      | 343                    | 2507       | 0,367 | 0,316 |

| 1      | 2   | 3    | 4     | 5      |
|--------|-----|------|-------|--------|
| Овес   |     |      |       |        |
| 4,08   | 344 | 4498 | 0,522 | -0,240 |
| 5,66   | 351 | 4645 | 0,371 | -0,444 |
| 7,05   | 349 | 4359 | 0,447 | -0,227 |
| 8,96   | 355 | 4326 | 0,325 | -0,283 |
| 10,50  | 358 | 4382 | 0,336 | -0,149 |
| 12,80  | 362 | 3945 | 0,280 | 0,029  |
| 14,36  | 358 | 3927 | 0,271 | -0,117 |
| 17,40  | 361 | 3929 | 0,276 | -0,070 |
| Ячмень |     |      |       |        |
| 1,89   | 356 | 3977 | 0,379 | -0,019 |
| 4,56   | 357 | 3663 | 0,374 | 0,142  |
| 7,36   | 358 | 3543 | 0,397 | 0,166  |
| 9,16   | 364 | 3432 | 0,364 | 0,228  |
| 11,60  | 362 | 3193 | 0,417 | 0,355  |
| 13,10  | 366 | 3347 | 0,377 | 0,253  |
| 15,28  | 367 | 3079 | 0,361 | 0,379  |
| 17,14  | 373 | 3057 | 0,289 | 0,464  |

Из данных таблицы 1 видно, что при увеличении содержания жира математическое ожидание для всех исследованных видов размолов зерна увеличивается, но статистически достоверную линейную аппроксимацию можно получить только для ячменя (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,89$ ) и в меньшей степени для овса ( $R^2 = 0,80$ ). Увеличение  $M_\lambda$  незначительное и составляет менее 5 % при увеличении жирности в 4–12 раз. Величина дисперсии  $\sigma^2$  уменьшается с увеличением концентрации жира, причем коэффициент детерминации высок для пшеницы ( $R^2 = 0,99$ ) и ячменя ( $R^2 = 0,93$ ), но само изменение дисперсии тоже не столь велико – не более 23 %.

Все характеристики  $\eta(\lambda)$  для всех видов зерна имеют правостороннюю асимметрию ( $As > 0$ ), которая с ростом  $C_F$  уменьшается также несистемно и незначительно. Величина эксцесса для каждого вида зерна меняется по-разному. Для пшеницы спектры поглощения имеют ярко выраженную островершинность, и с ростом жирности эксцесс несистемно уменьшается. Для овса спектры плосковершинные, но модуль эксцесса также несистемно уменьшается. Для овса с ростом  $C_F$  идет линейно аппроксимируемое ( $R^2 = 0,91$ ) увеличение эксцесса с переходом от плосковершинности к выраженной островершинности.

Таким образом, сложно выбрать какой-то единый статистический параметр для определения содержания жира ввиду несистемности и сравнительной малости изменений. Другим существенным недостатком использования параметров поглощения является необходимость измерения всего спектра  $\eta(\lambda)$  и сложность расчетов.

Поэтому для дальнейших исследований следует измерить длины волн наибольшего возбуждения  $\lambda_b$  и спектральные характеристики флуоресценции  $\phi(\lambda)$ .

В качестве примера спектры люминесценции зерна пшеницы с различным содержанием жиров при возбуждении  $\lambda_b = 362$  нм представлены на рисунке 2.

Все спектры люминесценции имеют по одному максимуму: для  $\lambda_b = 290$  нм – примерно на 344 нм, для  $\lambda_b = 362$  нм – на 447 нм, для  $\lambda_b = 414$  нм – на 515 нм. Из-за наличия тушения люминесценции при увеличении концентрации жира характеристики смещаются вниз, качественно не меняясь. Аналогично для размолов овса и ячменя.

Рассчитаны интегральные параметры спектральных характеристик размолов пшеницы при возбуждении  $\lambda_b = 290$  нм в диапазоне 360–500 нм,  $\lambda_b = 362$  нм – 410–600 нм,  $\lambda_b = 414$  нм – 490–650 нм. Результаты представлены в таблице 2.

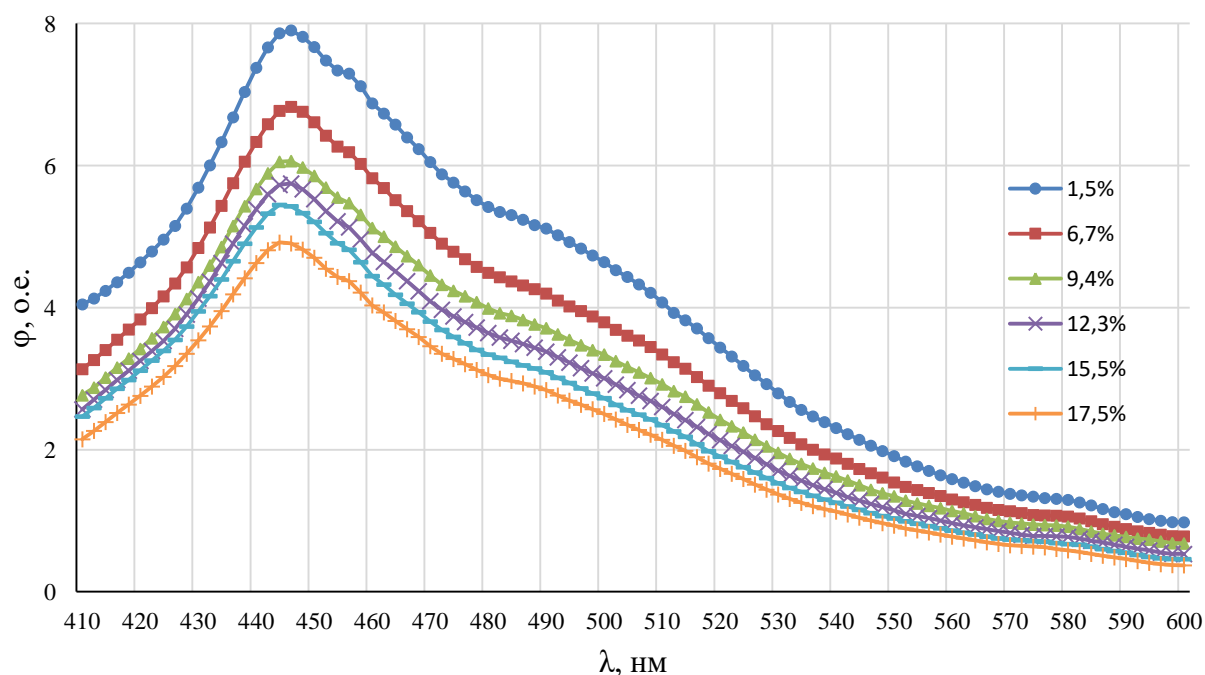


Рис. 2. Спектры люминесценции фуражного зерна пшеницы с различным содержанием жиров при возбуждении  $\lambda_e = 362$  нм

Luminescence spectra of feed wheat grain with different fat content under excitation  $\lambda_e = 362$  nm

Таблица 2

**Потоки фотолюминесценции размолотов пшеницы с различной концентрацией жира**  
**Photoluminescence flux of wheat grinds with different fat concentrations**

| $C_F, \%$ | $\Phi \pm \Delta\Phi$ , о. е., для $\lambda_b$ , нм |              |              |
|-----------|---|--------------|--------------|
|           | 290   | 362          | 414          |
| 1,5       | $361 \pm 25$  | $760 \pm 63$ | $383 \pm 25$ |
| 6,7       | $178 \pm 9$   | $633 \pm 46$ | $290 \pm 16$ |
| 9,4       | $209 \pm 16$  | $568 \pm 46$ | $252 \pm 16$ |
| 12,3      | $180 \pm 10$  | $511 \pm 30$ | $206 \pm 8$  |
| 15,5      | $154 \pm 13$  | $473 \pm 34$ | $181 \pm 11$ |
| 17,5      | $121 \pm 8$   | $427 \pm 30$ | $169 \pm 11$ |

Относительная погрешность определения потоков  $\Phi_\lambda$  составляет не более 8,4 % для  $\Phi_{290}$ , 8,3 – для  $\Phi_{362}$  и 6,5 % – для  $\Phi_{414}$  и в дальнейшем может быть уменьшена за счет увеличения числа измерений потока фотодиодами.

Теоретически для исследованных образцов корма с разной концентрацией жира уменьшение потока фотолюминесценции может быть объяснено тушением люминесценции при увеличении концентрации связанного жира в приповерхностных тканях. Статическое тушение обусловлено образованием нелюминесцирующего продукта в результате взаимодействия люминофора с тушителем. При одинаковом

коэффициенте поглощения люминофора и тушителя величина выхода люминесценции в отсутствие тушителя обратно пропорциональна выходу люминесценции в присутствии тушителя (в данном случае жира). Таким образом, в данном экспериментальном исследовании подтверждена обратная зависимость величины возбуждения (и зависящей от него люминесценции) от содержания жира.

Практически зависимости  $\Phi(C_F)$  для всех длин волн возбуждения получились падающими, но для  $\lambda_b = 290$  нм статистически достоверную аппроксимацию ( $R^2 = 0,88$ ) удалось получить только для более сложной степенной

функции. Для возбуждения излучением 362 и 414 нм получились линейные зависимости с коэффициентами детерминации 0,99 и 0,97 соответственно. Чувствительность функции для  $\lambda_b = 414$  нм на 31 % выше, но уровень исходного

фотосигнала в 2 раза ниже, чем при возбуждении 362 нм.

Результаты расчета интегральных параметров спектральных характеристик размолов овса и ячменя различной жирности представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Потоки фотолюминесценции размолов овса и ячменя с различной концентрацией жира**  
**Photoluminescence flux of milled oats and barley with different fat concentrations**

| $C_F, \%$ | $\Phi \pm \Delta\Phi$ , о. е., для $\lambda_b$ , нм |        |        |
|-----------|---|--------|--------|
|           | 282   | 362    | 424    |
| Овес      |   |        |        |
| 4,08      | 193±18  | 539±52 | 508±29 |
| 5,66      | 174±16  | 501±32 | 505±65 |
| 7,05      | 169±12  | 492±31 | 439±45 |
| 8,96      | 156±7   | 472±25 | 451±31 |
| 10,50     | 144±10  | 457±41 | 433±35 |
| 12,80     | 123±7   | 413±26 | 365±17 |
| 14,36     | 113±6   | 372±21 | 318±44 |
| 17,40     | 88±9  | 324±36 | 295±24 |
| Ячмень    |   |        |        |
| 1,89      | 151±14  | 441±63 | 342±18 |
| 4,56      | 137±11  | 416±32 | 288±20 |
| 7,36      | 118±14  | 408±58 | 281±18 |
| 9,16      | 102±14  | 331±47 | 262±13 |
| 11,60     | 92±13   | 344±70 | 248±17 |
| 13,10     | 85±9  | 332±58 | 246±15 |
| 15,28     | 78±12   | 330±69 | 233±12 |
| 17,14     | 68±8  | 314±55 | 231±8  |

Для всех трех использованных длин волн излучения возбуждения овса (282 нм, 362 и 424 нм) зависимости потоков от содержания жира статистически достоверно были аппроксимированы линейными функциями с коэффициентами детерминации 0,99, 0,98 и 0,94 соответственно. При этом наибольшая чувствительность получилась для  $\lambda_b = 282$  нм, но величины потока  $\Phi_{282}$  и линейно зависящие от них фотосигналы меньше, чем для других длин волн возбуждения в 2,7–3,7 раза. Наиболее предпоч-

тительным является использование длин волн возбуждения 362 и 424 нм.

Для ячменя, как и для овса, при всех длинах волн возбуждения получили падающие зависимости потока от содержания жира, линейно аппроксимируемые с высокой статистической достоверностью. Наибольшая чувствительность получилась также для коротковолнового возбуждения 282 нм, но с меньшим уровнем фотосигнала.

В качестве примера зависимости  $\Phi_{362}(C_F)$  для всех исследованных видов зерна представлены на рисунке 3.



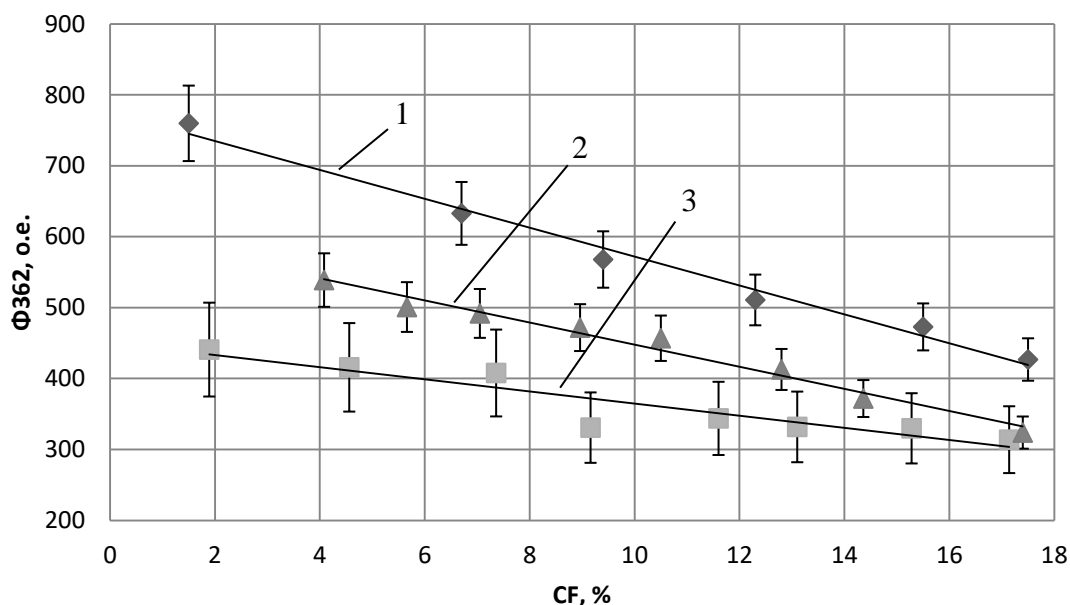


Рис. 3. Зависимости потоков фотолюминесценции  $\Phi_{362}$  от концентрации жира в размолах зерна пшеницы (1), овса (2) и ячменя (3)  
Dependences of photoluminescence fluxes  $\Phi_{362}$  on fat concentration in grain grinds of wheat (1), oats (2) and barley (3)

Из анализа полученных результатов следует, что для определения концентрации жира в размолах исследованных концентрированных растительных кормов необходимо использовать потоки фотолюминесценции  $\Phi_{\lambda}$ . Для других видов концентрированных кормов следует проводить аналогичные измерения с последующим расчетом параметров. Выбор конкретной длины волны возбуждения осуществляется из компромиссных соображений между максимальной чувствительностью, величиной потока (фотосигнала) и коэффициента детерминации, а также минимальной погрешностью. Другим немаловажным аспектом является возможность технической реализации и универсализации метода определения и реализующего его прибора. Так, коротковолновые источники излучения (282–290 нм) являются более дорогими и менее доступными, что затрудняет поиск компонентного состава прибора. Кроме того, в связи с тем, что фотолюминесцентный сигнал сравнительно мал, абсолютное значение потока  $\Phi_{\lambda}$  имеет очень важное значение, в то время как погрешность его измерения  $\Delta\Phi_{\lambda}$  может быть существенно уменьшена при многократных интегральных измерениях с быстродействующими световыми фотодиодами. С этой точки зрения следует отдавать предпочтение длинноволновому возбуждению 362 и 414/424 нм, однако для универ-

сализации компонентной базы более выгодным будет использование единого источника излучения для нескольких видов зерна, поэтому наиболее эффективным является излучение с длиной волны 362 нм.

**Заключение.** При увеличении концентрации жира в 4,3–11,7 раза качественные параметры характеристик поглощения всех видов зерна меняются примерно одинаково и незначительно, в то время как количественно характеристики уменьшаются, смещаясь вниз, а интегральная поглощательная способность падает в 1,8–2,1 раза. При этом из-за тушения люминесценции спектральные характеристики фотолюминесценции, не меняясь качественно, смещаются вниз. Зависимости интегральных потоков фотолюминесценции от концентрации жира для всех исследованных размолот зерен статистически достоверно (коэффициенты детерминации 0,852–0,995) могут быть аппроксимированы линейными функциями. Для создания метода и универсального прибора контроля содержания жира в зерновых кормах из компромиссных соображений наиболее целесообразным является использование потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 362 нм.

**Благодарность:** авторы выражают благодарность к. б. н. Д. А. Благову, к. т. н. Р. А. Баишевой за помощь в проведении экспериментов.

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: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
2. Иванов Ю.А. Стратегические направления развития молочного скотоводства // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 2 (46). С. 18–23. DOI: 10.51794/27132064-2022-2-18. EDN: BYHERR.
3. Фоменко П.А., Богатырева Е.В., Корельская Л.А., и др. Качество объемистых кормов в хозяйствах Вологодской области // Молочнохозяйственный вестник. 2016. № 1 (21). С. 50–56. EDN: VRXAVR.
4. Нода И.Б., Дорофеева Л.Л., Пономарев В.А. Качество и питательная ценность кормов в хозяйствах Ивановской области // Мир Инноваций. 2015. № 1-4. С. 117–124. EDN: ZGWNET.
5. Симонов Г.А., Никифоров В.Е., Маклахов А.В., и др. Определение влажности фуражного зерна при его производстве. // Эффективное животноводство. 2023. № 4 (186). С. 92–94. DOI: 10.24412/cl-33489-2023-4-92-94. EDN: HQEHGM.
6. Михайлова Л.Р., Жестянова Л.В., Лаврентьев А.Ю., и др. Эффективность применения природных цеолитов при кормлении молодняка // Главный зоотехник. 2022. № 6 (227). С. 13–22. DOI: 10.33920/sel-03-2206-02. EDN: GCSCNY.
7. Масалов В.Н., Березина Н.А., Червонова И.В. Состояние зернового хозяйства России, роль зерновых в кормлении сельскохозяйственных животных и питании человека. // Вестник аграрной науки. 2021. № 2 (89). С. 3–15. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.2.3. EDN: LMZPHJ.
8. Humer E., Zebeli Q. Grains in ruminant feeding and potentials to enhance their nutritive and health value by chemical processing // Animal Feed Science and Technology. 2017. Vol. 226. P. 133–151. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2017.02.005. EDN: YYPJIT.
9. Бусыгин П.О., Подобед Л.И., Беспмятных Н.Н., и др. Питательность кормов как один из главных факторов продуктивности и здоровья сельскохозяйственных животных // БИО. 2020. № 10 (241). С. 26–31. EDN: TSKMSI.
10. Сизова Е.А., Рязанцева К.В. Жиры и эмульгаторы в кормлении цыплят-бройлеров (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57, № 4. С. 664–680. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.4.664rus. EDN: XUFAIW.
11. Cooke A.S., Machekano H., Ventura-Cordero Ja., et al. Nyamukondiwa C. Opportunities to improve goat production and food security in Botswana through forage nutrition and the use of supplemental feeds // Food Security. 2024. Vol. 16, N 3. P. 607–622. DOI: 10.1007/s12571-024-01452-1. EDN: GBLRHI.
12. Elbaz A.M., Zaki E.F., Salama A.A., et al. Assessing different oil sources efficacy in reducing environmental heat-stress effects via improving performance, digestive enzymes, antioxidant status, and meat quality // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, N 1. P. 20179. DOI: 10.1038/s41598-023-47356-6. EDN: PJRIDL.
13. Ogbuwu I.P., Mbajorgu C.A. Enhancement of nutritional and functional qualities of tropical leaf meal as feed ingredients in chickens through the use of fermentation technology // Tropical Animal Health Production. 2024. Vol. 56, N 8. P. 377. DOI: 10.1007/s11250-024-04223-4. EDN: TZWCMC.
14. Radhakrishnan D.K., AkbarAli I., Velayudhannair K., et al. Exploring the role of plant oils in aquaculture practices: an overview // Aquaculture International. 2024. Vol. 32. P. 7719–7745. DOI: 10.1007/s10499-024-01538-9. EDN: LEXPPU.
15. Sandström V., Chrysafi A., Lamminen M., et al. Food system by-products upcycled in livestock and aquaculture feeds can increase global food supply // Nature Food. 2022. Vol. 3, N 9. P. 729–740. DOI: 10.1038/s43016-022-00589-6. EDN: CHZNTI.
16. Han S., Zhang F., Zhao Y., et al. A comparative study of the intestinal digestive characteristics of different feeds for Holstein cows // Animal Diseases. 2022. Vol. 2, N 1. P. 17. DOI: 10.1186/s44149-022-00049-5. EDN: NGKFRP.

17. Dou Zh., Toth J.D., Pitta D.W., et al. Proof of concept for developing novel feeds for cattle from wasted food and crop biomass to enhance agri-food system efficiency // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, N 1. P. 13630. DOI: 10.1038/s41598-022-17812-w. EDN: VRTXUY.
18. Kowalska G., Pankiewicz U., Kowalski R. Evaluation of Chemical Composition of Some Silphium L. Species as Alternative Raw Materials // *Agriculture*. 2020. Vol. 10, N 4. P. 132. DOI: 10.3390/agriculture10040132. EDN: BIKPPV.
19. Rani S., Singh N., Kaur Ch., et al. Measurement of phytochemical content and nutritional characteristics of microgreens grown in high altitude region of India // *Food Measure*. 2024. Vol. 18. P. 3113–3127. DOI: 10.1007/s11694-024-02390-4. EDN: UOCFDY.
20. Курзова А.А., Князева А.С., Вострикова Н.Л. Сравнительная оценка различных методов извлечения жира из многокомпонентных мясных систем. // *Все о мясе*. 2018. № 3. С. 28–31. DOI: 10.21323/2071-2499-2018-3-28-31. EDN: USHXFR.
21. Басова Е.А., Ядрищенская О.А., Шпынова С.А., и др. Масличные культуры, выращенные на территории Западной Сибири // *Птицеводство*. 2021. № 7-8. С. 16–21. DOI: 10.33845/0033-3239-2021-70-7-8-16-21. EDN: QHVQPB.
22. Hewavitharana G.G., Perera S.B., Navaratne S.B., et al. Extraction methods of fat from food samples and preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatography: A review // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13, N 8. P. 6865–6875. DOI: 10.1016/j.arabjc.2020.06.039. EDN: TTRKXQ.
23. Burmistrov D.E., Pavkin D.Yu., Khakimov A.R., et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry // *Photonics*. 2021. Vol. 8, N 12. DOI: 10.3390/photonics8120551. EDN: RAXXHN.
24. Сергеева А.С. Актуальные вопросы определения содержания жира в пищевых продуктах и продовольственном сырье (обзор) // *Эталон. Стандартные образцы*. 2024. Т. 20, № 1. С. 59–84. DOI: 10.20915/2077-1177-2024-20-1-59-84. EDN: PMWQXJ.
25. Беляков М.В., Никитин Е.А., Ефременков И.Ю. Эффективность фотолюминесцентного метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 3. С. 55–61. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61. EDN: LIWODN.
26. Беляков М.В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений // *Агрофизика*. 2024. № 4. С. 72–78. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.04.09. EDN: MMYHXZ.
27. Matveeva T.A., Sarimov R.M., Persidskaya O.K., et al. Application of Fluorescence Spectroscopy for Early Detection of Fungal Infection of Winter Wheat Grains // *AgriEngineering*. 2024. N 6. P. 3137–3158. DOI: 10.3390/agriengineering6030179. EDN: JEGUAV.

## References

1. Lobachevskiy YaP, Dorokhov AS. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10. (In Russ.). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
2. Ivanov YuA. Strategic directions of dairy cattle breeding development. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2022;2:8-23. (In Russ.). DOI: 10.51794/27132064-2022-2-18. EDN: BYHERR.
3. Fomenko PA, Bogatyreva EV, Korel'skaya LA, et al. The quality of bulky feeds on the farms of the Vologda Region. *Molochnohozyajstvennyj vestnik*. 2016;1:50-56. (In Russ.). EDN: VRXAVR.
4. Noda IB, Dorofeeva LL, Ponomarev VA. Kachestvo i pitatel'naya cennost' kormov v hozyajstvah Ivanovskoy oblasti. *World of innovation*. 2015;(1-4):117-124. (In Russ.). EDN: ZGWNET.
5. Simonov GA, Nikiforov VE, Maklahov AV, et al. Opredelenie vlazhnosti furazhnogo zerna pri ego proizvodstve. *Effektivnoe zhivotnovodstvo*. 2023;4:92-94. (In Russ.). DOI: 10.24412/cl-33489-2023-4-92-94. EDN: HQEHGM.
6. Mikhaylova LR, Zhestyanova LV, Lavrentiev AYU, et al. The effectiveness of use of natural zeolites in feeding of young pigs. *Head of Animal Breeding*. 2022;6:13-22. (In Russ.). DOI: 10.33920/sel-03-2206-02. EDN: GCSCNY.

7. Masalov VN, Berezina NA, Chervonova IV. The state of the grain farming in Russia, the role of grain crops in the feeding of agricultural animals and human diet. *Bulletin of agrarian science*. 2021;2:3-15. (In Russ.). DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.2.3. EDN: LMZPHJ.
8. Humer E, Zebeli Q. Grains in ruminant feeding and potentials to enhance their nutritive and health value by chemical processing. *Animal Feed Science and Technology*. 2017;226:133-151. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2017.02.005. EDN: YYPJIT.
9. Busygin PO, Podobed LI, Bepamyatnyh NN, et al. Pitatel'nost' kormov kak odin iz glavnih faktorov produktivnosti i zdorov'ya sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh. *B/O*. 2020;10:26-31 (In Russ.). EDN: TSKMSI.
10. Sizova EA, Ryazantseva KV. Fats and emulsifiers in feeding broiler chickens (review). *Agricultural Biology*. 2022;57(4):664-680. (In Russ.). DOI: 10.15389/agrobiology.2022.4.664rus. EDN: XUFAIW.
11. Cooke AS, Machekano H, Ventura-Cordero Ja, et al. Nyamukondiwa C. Opportunities to improve goat production and food security in Botswana through forage nutrition and the use of supplemental feeds. *Food Security*. 2024;16(3):607-622. DOI: 10.1007/s12571-024-01452-1. EDN: GBLRHI.
12. Elbaz AM, Zaki EF, Salama AA, et al. Assessing different oil sources efficacy in reducing environmental heat-stress effects via improving performance, digestive enzymes, antioxidant status, and meat quality. *Scientific Reports*. 2023;13(1):20179. DOI: 10.1038/s41598-023-47356-6. EDN: PJRIDL.
13. Ogbuewu IP, Mbajorgu CA. Enhancement of nutritional and functional qualities of tropical leaf meal as feed ingredients in chickens through the use of fermentation technology. *Tropical Animal Health Production*. 2024;56(8):377. DOI: 10.1007/s11250-024-04223-4. EDN: TZWCMC.
14. Radhakrishnan DK, AkbarAli I, Velayudhannair K, et al. Exploring the role of plant oils in aquaculture practices: an overview. *Aquaculture International*. 2024;32:7719-7745. DOI: 10.1007/s10499-024-01538-9. EDN: LEXPPU.
15. Sandström V, Chrysafi A, Lamminen M, et al. Food system by-products upcycled in livestock and aquaculture feeds can increase global food supply. *Nature Food*. 2022;3(9):729-740. DOI: 10.1038/s43016-022-00589-6. EDN: CHZNTI.
16. Han S, Zhang F, Zhao Y, et al. A comparative study of the intestinal digestive characteristics of different feeds for Holstein cows. *Animal Diseases*. 2022;2(1):17. DOI: 10.1186/s44149-022-00049-5. EDN: NGKFRP.
17. Dou Zh, Toth JD, Pitta DW, et al. Proof of concept for developing novel feeds for cattle from wasted food and crop biomass to enhance agri-food system efficiency. *Scientific Reports*. 2022;12(1):13630. DOI: 10.1038/s41598-022-17812-w. EDN: VRTXUY.
18. Kowalska G, Pankiewicz U, Kowalski R. Evaluation of Chemical Composition of Some Silphium L. Species as Alternative Raw Materials. *Agriculture*. 2020;10(4):132. DOI: 10.3390/agriculture10040132. EDN: BIKPPV.
19. Rani S, Singh N, Kaur Ch, et al. Measurement of phytochemical content and nutritional characteristics of microgreens grown in high altitude region of India. *Food Measure*. 2024;18:3113-3127. DOI: 10.1007/s11694-024-02390-4. EDN: UOCFDY.
20. Kurzova AA, Knyazeva AS, Vostrikova NL. New standards for test methods of meat products. *Vsyo o myase*. 2018;(3):28-31. (In Russ.). DOI: 10.21323/2071-2499-2018-3-28-31. EDN: USHXFR.
21. Basova EA, Yadrishchenskaya OA, Shpynova SA, et al. Oilseed crops grown in Western Siberia: composition and use in poultry diets. *Pticevodstvo*. 2021;(7-8):16-21. (In Russ.). DOI: 10.33845/0033-3239-2021-70-7-8-16-21. EDN: QHVQPB.
22. Hewavitharana GG, Perera SB., Navaratne SB., et al. Extraction methods of fat from food samples and preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatography: A review // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020;13(8):6865-6875. DOI: 10.1016/j.arabjc.2020.06.039. EDN: TTRKXQ.
23. Burmistrov DE, Pavkin DYU, Khakimov AR, et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry. *Photonics*. 2021;8(12). DOI: 10.3390/photonics8120551. EDN: RAXXHN.
24. Sergeeva AS. Current issues in determining fat content in food products and food raw materials (review). *Measurement standards. reference materials*. 2024;20(1):59-84. (In Russ.). DOI: 10.20915/2077-1177-2024-20-1-59-84. EDN: PMWQXJ.

25. Belyakov MV, Nikitin EA, Efremenko IYu. Efficiency of the photoluminescent method for monitoring the homogeneity of feed mixtures in animal husbandry. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2022;16(3):55-61. (In Russ.). DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61. EDN: LIWODN.
26. Belyakov MV. Optical luminescent properties of agricultural plants' seeds. *Agrofizika*. 2024;(4):72-78. (In Russ.). DOI: 10.25695/AGRPH.2024.04.09. EDN: MMYHXZ.
27. Matveeva TA, Sarimov RM, Persidskaya OK, et al. Application of Fluorescence Spectroscopy for Early Detection of Fungal Infection of Winter Wheat Grains. *AgriEngineering*. 2024;(6):3137-3158. DOI: 10.3390/agriengineering6030179. EDN: JEGUAV.

Статья принята к публикации 15.09.2025 / The article accepted for publication 15.09.2025.

Информация об авторах:

**Михаил Владимирович Беляков**, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, доктор технических наук, доцент

**Денис Сергеевич Пятченков**, специалист лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, магистр

Information about the authors:

**Mikhail Vladimirovich Belyakov**, Chief Researcher at the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Denis Sergeevich Pyatchenkov**, Specialist at the Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry, Master's degree

