УДК 631.363:535.372
Код ВАК 4.2.4
https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-586-596

Фотолюминесцентный метод контроля влажности жмыхов

М. В. Беляков✉, **Е. А. Никитин, Д. С. Пятченков, Д. А. Благов**
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
✉*E-mail: bmw20100@mail.ru*

Аннотация. Для отслеживания содержания сухого вещества в кормах необходима разработка методов и приборов, которые будут быстро и точно измерять влажность. **Цель** исследований – применение люминесцентного метода контроля содержания влаги в соевом и подсолнечном жмыхах для создания методики фотолюминесцентного определения влажности жмыхов и обоснования параметров оборудования для ее реализации. **Методы**. Предварительно готовили измельченные образцы соевого и подсолнечного жмыхов с арбитражным контролем влажности на анализаторе ML-50. Измеряли их спектральные характеристики в диапазоне 250–600 нм на дифракционном спектрофлуориметре СМ2203. Вычисляли интегральную поглощательную способность и поток фотолюминесценции, а также статистические параметры: математическое ожидание, дисперсию, асимметрию и эксцесс. **Результаты**. Спектры соевого жмыха содержат максимумы на длинах волн 282 нм, 365 нм, 388 нм и 428 нм, а спектры подсолнечного жмыха – только на 382 нм и 424 нм. При увеличении влажности спектральные характеристики возбуждения и фотолюминесценции смещаются вниз. Для измерения влажности соевого жмыха целесообразно использовать возбуждающее излучение с длиной волны 365 нм ввиду относительно малой погрешности (5,5 %) и наибольшей величины фотосигнала. Для подсолнечного жмыха следует использовать длину волны возбуждающего излучения 382 нм из-за наибольшей чувствительности и величины фотосигнала. Линейные аппроксимации зависимостей потока от влажности для жмыхов являются статистически достоверными ($R^2 = 0{,}83$ для соевого и $R^2 = 0{,}94$ для подсолнечного). Статистические параметры жмыхов в зависимости от влажности меняются либо несистемно, либо нелинейно. Методика фотолюминесцентного контроля влажности жмыхов включает в себя возбуждение и регистрацию потока люминесцентного излучения с последующим усилением сигнала и расчетом влажности по полученным зависимостям. **Научная новизна**. Впервые измерены спектры и рассчитаны параметры люминесценции жмыхов различной влажности. Получены зависимости потоков фотолюминесценции от влажности жмыхов. Разработана методика определения влажности, обоснованы спектральные параметры источников и приемников излучения для ее последующей приборной реализации.

Ключевые слова: концентрированные корма, приготовление кормов, жмых соевый, жмых подсолнечный, влажность, поток фотолюминесценции, статистические параметры

Для цитирования: Беляков М. В., Никитин Е. А., Пятченков Д. С., Благов Д. А. Фотолюминесцентный метод контроля влажности жмыхов // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 04. С. 586–596. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-586-596.

Дата поступления статьи: 28.10.2024, ***дата рецензирования:*** 09.12.2024, ***дата принятия:*** 17.02.2025.

© Беляков М. В., Никитин Е. А., Пятченков Д. С., Благов Д. А., 2025

Photoluminescent method of monitoring the moisture content of cake

M. V. Belyakov✉, **E. A. Nikitin, D. S. Pyatchenkov, D. A. Blagov**
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
✉*E-mail: bmw20100@mail.ru*

Abstract. To track the dry matter content in feed, it is necessary to develop methods and devices that will rapidly and accurately measure humidity. **The purpose** of the research is to use a luminescent method to control the moisture content in soybean and sunflower cakes to create a technique for photoluminescent determination of the moisture content of cakes and substantiate the parameters of the equipment for its implementation. **Methods**. Pre-prepared crushed samples of soybean and sunflower cake with arbitrage humidity control on an ML-50 analyzer. Their spectral characteristics were measured in the range of 250–600 nm using a CM2203 diffraction spectrofluorimeter. The integral absorption capacity and photoluminescence flux were calculated, as well as statistical parameters: expectation, variance, asymmetry and kurtosis. **Results**. The spectra of soybean cake contain maxima at wavelengths of 282 nm, 365 nm, 388 nm and 428 nm, while the spectra of sunflower cake contain only maxima of 382 nm and 424 nm. With increasing humidity, the spectral characteristics of excitation and photoluminescence shift downwards. To measure the moisture content of soybean meal, it is advisable to use exciting radiation with a wavelength of 365 nm due to the relatively small error (5.5 %) and the largest magnitude of the photo signal. For sunflower cake, the wavelength of the exciting radiation 382 nm should be used because of the highest sensitivity and magnitude of the photo signal. Linear approximations of the flow dependence on humidity for cake are statistically reliable ($R^2 = 0.83$ for soybean and $R^2 = 0.94$ for sunflower). The statistical parameters of the cake, depending on humidity, change either non-systematically or non-linearly. The technique of photoluminescent moisture control of cakes includes excitation and registration of the luminescent radiation flux, followed by signal amplification and humidity calculation based on the obtained dependencies. **Scientific novelty**. For the first time, the spectra were measured and the luminescence parameters of cakes of various humidity were calculated. Dependences of photoluminescence fluxes on the moisture content of cakes are obtained. A method for determining humidity has been developed and the spectral parameters of radiation sources and receivers have been substantiated for its subsequent instrument implementation.

Keywords: concentrated feed, feed preparation, soybean cake, sunflower cake, humidity, photoluminescence flux, statistical parameters

For citation: Belyakov M. V., Nikitin E. A., Pyatchenkov D. S., Blagov D. A. Photoluminescent method of monitoring the moisture content of meal. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (04): 586–596. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-586-596. (In Russ.)

Date of paper submission: 28.10.2024, ***date of review:*** 09.12.2024, ***date of acceptance:*** 17.02.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Кормление крупного рогатого скота – это ключевое технологическое мероприятие, определяющее себестоимость производства продукции животноводства при производстве молока и говядины. Помимо продуктивности животных, определяемой суточным привесом живой массы животного или количества получаемого молока при доении, кормление и состав рациона влияют на количество получаемых организмом животного полезных химических веществ, способствующих поддержанию продуктивного долголетия.

Наиболее значимым показателем, который определяет количество попадающих в организм животного питательных веществ, является уровень содержания сухого вещества.

На практике этот показатель определяют двумя способами:

1) прямой способ предполагает первичное определение массы образца корма и проведение последующей сушки с использованием специализированного оборудования и определения массы высушенного образца, который характеризует долю нейтрализованной влаги и остаток сухого вещества;

2) косвенный способ предполагает определение содержания влаги в исследуемом образце, например, диэлькометрическим методом и расчет обратной величины, которая характеризует содержание сухого вещества [1].

Процедуры, связанные с определением содержания сухого вещества или влажности биообъектов, имеют высокую актуальность в перерабатывающей промышленности на этапе входного кон-

© Belyakov M. V., Nikitin E. A., Pyatchenkov D. S., Blagov D. A., 2025

троля растительного сырья и зерновых культур. Зарегистрированные параметры определяют типы технологического воздействия на биообъект при последующей переработке и режимы работы технологического оборудования.

В животноводстве определение сухого вещества или влажности необходимо в случае применения технологии кормления полнорационными кормовыми смесями, когда каждый компонент объемистого корма (силос, сено, сенаж), концентрированного корма (зерновые размолы, жмыхи, шроты) и минеральные добавки измельчают и смешивают в виде кормовой смеси.

При этом балансирование кормовой смеси осуществляется не только по содержанию сухого вещества, но и по другим показателям питательной ценности, таким как содержание протеина, содержание крахмала, содержание клетчатки и др.

В большинстве своем основу рациона кормления крупного рогатого скота формируют объемистые корма, которые в 99 % случаев выращиваются и производятся собственными силами предприятия, специализирующегося на производстве продукции животноводства [2].

В то же время добиваться достаточного количественного содержания протеина в объемистых кормах собственного выращивания – довольно сложная задача, которая требует регулярного ухода за полевыми угодьями, в том числе предполагающего внесение органических и минеральных удобрений. Как следствие, большинство производителей продукции животноводства, получаемой от крупного рогатого скота, балансируют кормовую смесь по содержанию протеина, уровень которого удовлетворит потребностям животного для достижения конкурентных показателей продуктивности на мировом уровне, путем использованием белковых кормовых добавок, получаемых на перерабатывающих продукцию растениеводства предприятиях.

В качестве белковых кормовых добавок наиболее часто используют жмыхи и шроты [3]. Например, жмых соевый и подсолнечный – энергетически ценные компоненты. Кормовым достоинством соевого жмыха является его аминокислотный состав, который схож с белками животного происхождения, а также высокое содержание нерасщепляемого протеина в рубце на уровне 39,7 %. Это позволяет получить дополнительный белок, идущий на синтез молока, путем включения соответствующего компонента в кормовую смесь. Добавление соевого жмыха в рацион лактирующих коров в количестве 1–2 кг позволяет увеличить молочную продуктивность на 1,5–2 л [4; 5].

Жмых подсолнечный является ценным белковым сырьем, в котором содержится до 90 % расщепляемого протеина в рубце [6]. Однако необходимо учитывать, что содержание защищенного протеина в нем не превышает 10 %, в то время как в соевом его до 45 %. Это может со временем привести к заболеваниям печени из-за образующегося аммиака [7; 8]. К достоинствам жмыха из подсолнечника можно отнести его вкусовые качества и поедаемость животными, что способствует быстрому росту живой массы, повышает иммунитет за счет своего витаминно-минерального состава и т. д. [9].

Кроме описанных кормовых достоинств, данные корма имеют высокое содержание сухого вещества: жмых подсолнечный – 920 г, а жмых соевый – 910 г. Стоит отметить, что в среднем содержание сухого вещества для жмыхов и шротов находится на уровне 90 % (900 г/кг). Если же данный вид корма имеет более низкое содержание данного показателя, то это будет свидетельствовать о том, что данные корма хранились в ненадлежащих условиях, а также с ростом влажности уменьшается содержание питательных веществ в весовом выражении [10]. Кроме того, если в жмыхах больше влаги, чем предусмотрено ГОСТ 27149-95, ГОСТ 80-96, то такие корма будут иметь ограниченный срок хранения, поскольку станут средой для развития патогенной микрофлоры и и в дальнейшем на корм животным не пойдут [11].

Поэтому в основу менеджмента кормления, помимо балансирования протеиновой питательной ценности, необходимо положить определение и отслеживание содержания сухого вещества на различных технологических этапах.

Для решения данной задачи необходимы приборы, которые будут проводить оперативное измерение значимых показателей питательной ценности с учетом вида жмыха. При этом прибор должен обладать высокой скоростью работы. Среди существующих решений наиболее эффективно удовлетворяют подобным требованиям оптические приборы.

Обобщая вышеизложенное, необходимо учитывать, что компоненты кормовой смеси (жмых подсолнечный, жмых соевый) для производителя продукции животноводства являются покупными и дорогостоящими, вследствие чего входной контроль на предмет содержания уровня влаги в жмыхах является достаточно злободневным вопросом и позволяет определять технологическое соответствие приобретаемого корма на этапе поставки.

Содержание влаги в последующем служит основой в принятии управленческого решения (масса дозирования компонента на голову) при включении белкового корма в кормовую смесь на этапе составления рациона и непосредственного приготовления [12; 13].

Определение содержания влаги позволяет производить приборы, функционирующие на основе различных химических методов. При этом в научной практике чаще упоминают оптические методы, которые основаны на детектировании оптической реакции при попадании излучения различной дли-

ны волны на исследуемый образец, размещенный в светозащитной камере [14].

Например, фотолюминесцентный метод детектирования биообъектов дает возможность обеспечивать сквозной контроль качества выращиваемой сельскохозяйственной продукции на предмет предельно допустимых концентраций нежелательных кислот, определять эффективность обеззараживания семян фунгицидом, выявлять на ранней стадии бактерии, провоцирующие развитие фузариоза [15; 16].

Аппаратную часть подобных приборов составляют электронные компоненты, воспринимающие фотосигнал и используемые в том числе в промышленной сфере и системах безопасности [17].

Более совершенные аппаратно-программные комплексы, где средства оптического контроля оснащаются вычислительным устройством с алгоритмами машинного обучения, позволяют сегментировать вещества в растворах или смесях и прогнозировать их свойства на основе методов нечеткой логики [18; 19]

Ключевым недостатком существующих исследований является нечеткое описание процесса создания оптических калибровок и алгоритмов, которые служат инструментом интерпретации косвенных параметров фотолюминесценции, характеризующих изменение питательной ценности сельскохозяйственных кормов, содержания влаги или содержания сухого вещества [20].

Представленное исследование во многом объясняет процесс экспресс-детектирования содержания влаги в кормах люминесцентным методом.

Цель исследований – изучение возможностей применения люминесцентного метода для контроля содержания влаги в соевом и подсолнечном жмыхах для создания методики фотолюминесцентного определения влажности жмыхов и обоснования параметров оборудования для ее реализации.

Методология и методы исследования (Methods)

Процесс дробления опытных образцов жмыха производили с помощью устройства по типу лабораторной мельницы ЛЗМ со стальным двухлопастным ножом в течение 60 секунд, что обеспечивало измельчение до заданной крупности. Модуль помола определяли решетчатым классификатором, который представляет собой прибор с набором расположенных друг над другом сит с различными отверстиями (при этом внутри каждого сита они одинаковые). Максимальный диаметр частицы в пробе – 1 мм. Полученную навеску корма отправляют в анализатор влажности AND ML-50 для установления первичного содержания влаги в исследуемом образце. Масса навески берется в количестве 10 г и равномерно распределяется по тарелке прибора. Сушка проводится при 130 °С (ГОСТ 31640-2012). Зная исходную влажность корма, при помощи добавления дистиллированной воды капельным методом (при помощи пипетки Пастера) осуществляется варьирование исходного показателя. Эмпирическим путем было установлено, что 0,15–0,2 грамма воды увеличивают содержание влаги на 1,7 %. Исходя из полученных данных, последовательно готовится не менее 4 навесок с различным уровнем влажности с шагом в 0,2 грамма. Методика уменьшения содержание влажности в концентрированном корме является схожей с ее увеличением. После того как была определена влажность корма, устанавливается шаг уменьшения значения. Это необходимо для получения не менее 3 точек до конечной влажности. Например, влажность размола ячменя составила 7 %, тогда для определения шага необходимо 7 / 3 = 2,33 %. Следовательно, шаг при сушке исследуемой навески будет 1 = 2,33 %, 2 = 4,67 %, 3 = 6,99 %. При достижении требуемого значения влажности AND ML-50 останавливают. Полученные навески необходимой влажности передаются для спектральных измерений.

Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции получали с помощью спектрофлуориметра CM2203 (SOLAR). Методика проведения исследований аналогична [15]. Спектры возбуждения $\eta_э(\lambda)$ измеряли при синхронном сканировании в диапазоне от 250–600 нм. В спектрах возбуждения определяли основные максимумы (пики) с длинами волн $\lambda_в$ и при возбуждении ими измеряли спектры фотолюминесценции $\varphi_л(\lambda)$. Затем были рассчитаны интегральная поглощательная способность *H* и поток фотолюминесценции Ф. В программном пакете Microcal Origin были рассчитаны статистические параметры – математическое ожидание M_λ, дисперсия σ^2, асимметрия *As* и эксцесс *Ex*.

Результаты (Results)

Спектры возбуждения размолов соевого жмыха различной влажности представлены на рис. 1.

Спектр размолотого соевого жмыха содержит два наиболее выраженных основных максимума: 388 нм и 428 нм. Менее выраженными являются характерный для растительных кормов максимум 365 нм и небольшой коротковолновый максимум 282 нм. В дальнейшем эти максимумы были выбраны в качестве длин волн возбуждения $\lambda_в$ для измерения спектров люминесценции $\varphi_л(\lambda)$. В спектре возбуждения размолотого подсолнечного жмыха имеются только максимумы 382 нм и 424 нм.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведено семейство спектров люминесценции при возбуждении $\lambda_в$ = 362 нм для соевого жмыха и $\lambda_в$ = 424 нм для подсолнечного жмыха соответственно.

Спектральные характеристики люминесценции находятся в диапазонах 410–600 нм для возбуждения $\lambda_в$ = 282 нм и $\lambda_в$ = 362 нм, но по максимальным значениям вторые превосходят первые более чем в 4 раза. При увеличении влажности кривые смещаются вниз, но в диапазоне влажностей примерно 9–12 % кривые накладываются друг на друга.

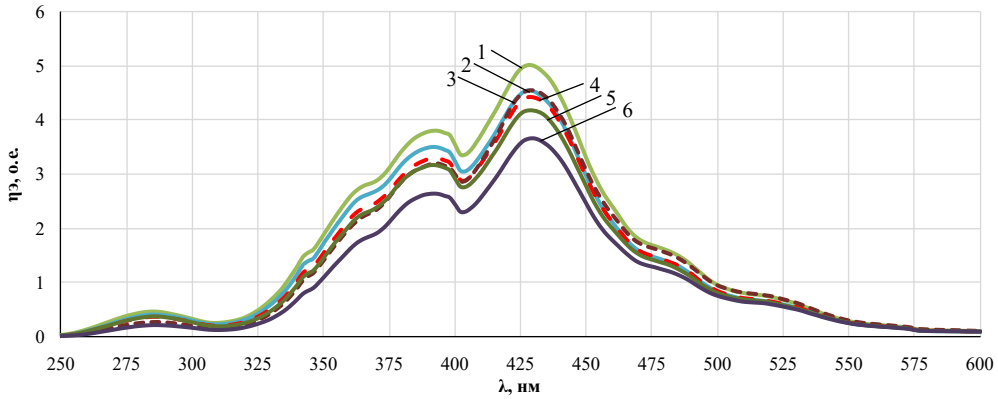

Рис. 1. Синхронные спектры возбуждения размола соевого жмыха различной влажности: 1 – 5,8 %, 2 – 11,9 %, 3 – 8,1 %, 4 – 9,4 %, 5 – 13,8 %, 6 – 15,5 %

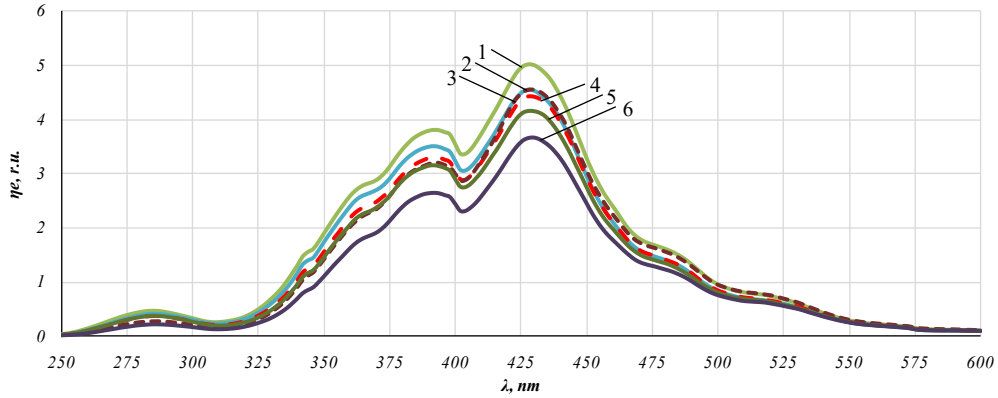

Fig. 1. Synchronous excitation spectra of soybean meal grinding of different humidity: 1 – 5.8 %, 2 – 11.9 %, 3 – 8.1 %, 4 – 9.4 %, 5 – 13.8 %, 6 – 15.5 %

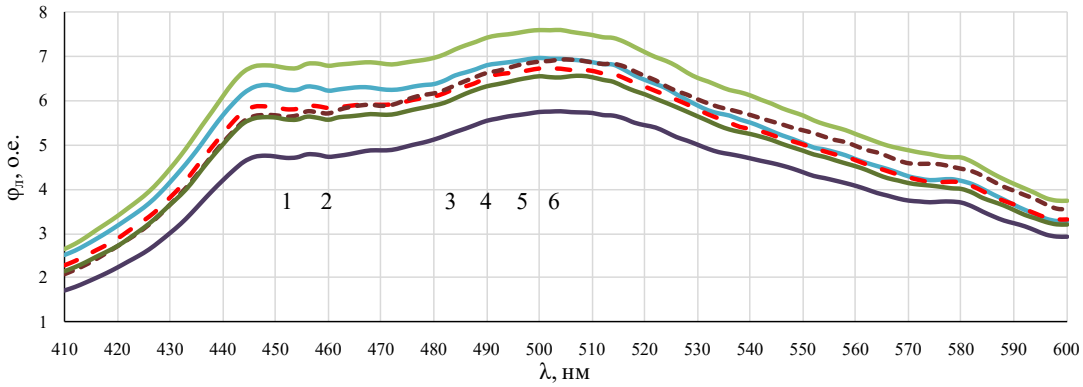

Рис. 2. Спектры люминесценции размола соевого жмыха различной влажности для длины волны возбуждения 362 нм: 1 – 5,8 %, 2 – 8,1 %, 3 – 11,9 %, 4 – 9,4 %, 5 – 13,8 %, 6 – 15,5 %

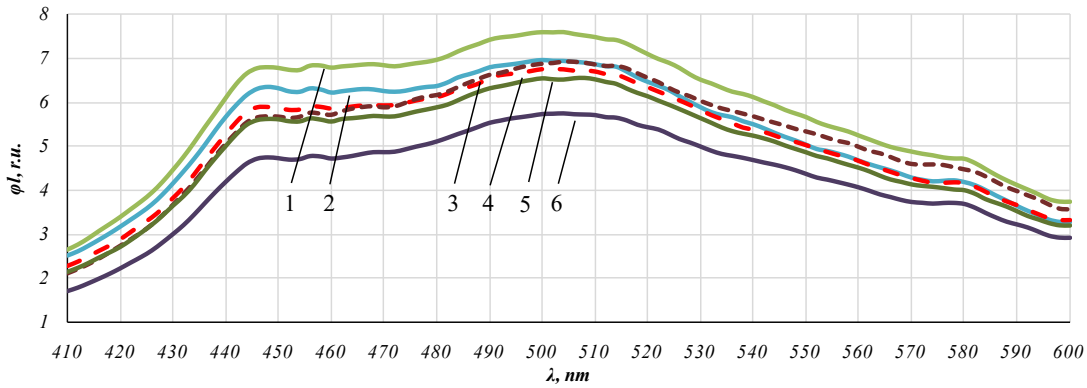

Fig. 2. Luminescence spectra of soybean meal grinding of different humidity for an excitation wavelength of 362 nm: 1 – 5.8 %, 2 – 8.1 %, 3 – 11.9 %, 4 – 9.4 %, 5 – 13.8 %, 6 – 15.5 %

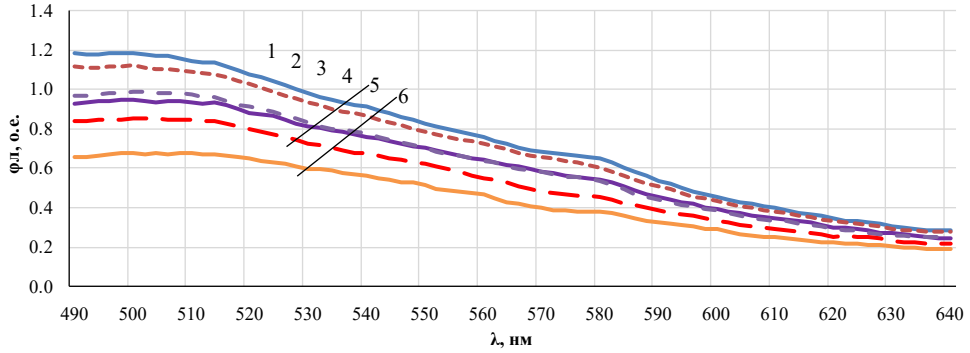

Рис. 3. Спектры фотолюминесценции размола подсолнечного жмыха различной влажности для длины волны возбуждения 424 нм: 1 – 8,2 %; 2 – 10,3 %; 3 – 14,7 %; 4 – 13,0 %; 5 – 16,3 %; 6 – 19,1 %

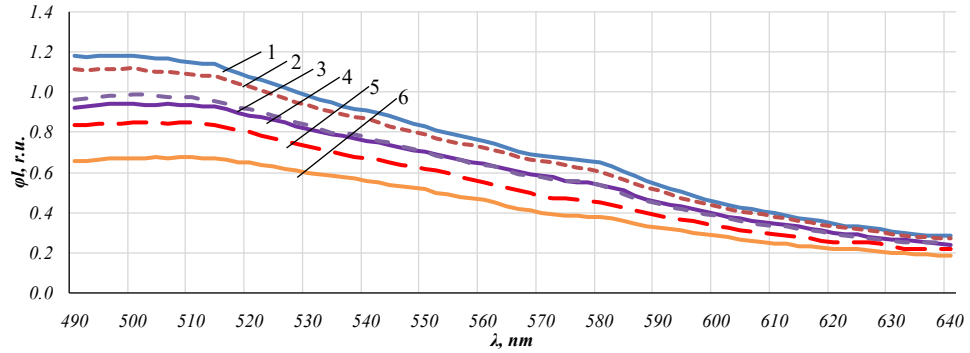

Fig. 3. Photoluminescence spectra of sunflower cake grinding of different humidity for an excitation wavelength of 424 nm: 1 – 8.2 %; 2 – 10.3 %; 3 – 14.7 %; 4 – 13.0 %; 5 – 16.3 %; 6 – 19.1 %

То же самое характерно для спектров $\varphi_л(\lambda)$ подсолнечного жмыха (рис. 3): кривые с увеличение влажности смещаются вниз, но при средних влажностях 13–15 % происходит их наложение.

Рассчитанные интегральные потоки фотолюминесценции и статистические параметры спектров возбуждения представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Для соевого жмыха максимальная относительная погрешность наиболее высокая при $\lambda_в$ = 282 нм (8,2 %), а для остальных длин волн возбуждения – заметно меньше: для $\lambda_в$ = 365 нм – не более 5,5 %, для $\lambda_в$ = 388 нм и $\lambda_в$ = 428 нм – не более 4,7 % и 4,3 % соответственно. Вместе с тем при линейной аппроксимации зависимостей $\Phi(W)$ она является статистически достоверной только для $\lambda_в$ = 282 нм (коэффициент детерминации R^2 = 0,87) и $\lambda_в$ = 365 нм (R^2 = 0,83). Рассчитана относительная чувствительность изменения потока при изменении влажности по формуле:

$$S_{отн} = \left| 100 \frac{\Delta\Phi}{\Delta W \cdot \Phi_{макс}} \right|, \quad (1)$$

где $\Delta\Phi/\Delta W$ – скорость изменения потока при изменении влажности,

$\Phi_{макс}$ – максимальное значение потока.

Установлено, что наибольшая чувствительность 2,74 о.е./% характерна для $\lambda_в$ = 282 нм, а для $\lambda_в$ = 365 нм она немного меньше – 2,14 о.е./%. Однако существенным достоинством возбуждения $\lambda_в$ = 365 нм являются в более чем в пять раз больший фотосигнал (см. таблицу 1) и использование более дешевых и распространенных светодиодов при приборной реализации измерений. Таким образом, из компромиссных соображений выберем возбуждающее излучение длины волны 365 нм для контроля влажности соевого жмыха.

Для подсолнечного жмыха при возбуждении излучением 382 нм меньше относительная погрешность определения потока (до 7,4 % против 12,5 % у $\lambda_в$ = 424 нм), выше относительная чувствительность (4,21 о.е./% против 3,55 о.е./% у $\lambda_в$ = 424 нм) и в 2,2–2,6 раза выше величина фотосигнала. При этом линейные аппроксимации зависимостей $\Phi_{382}(W)$ и $\Phi_{424}(W)$ являются статистически достоверными (R^2 = 0,94 и R^2 = 0,96 соответственно). Таким образом, наилучшим будет использование излучение 382 нм для фотолюминесцентного контроля влажности подсолнечного жмыха.

Статистические параметры соевого жмыха в зависимости от влажности меняются несистемно (коэффициент детерминации 0,34–0,61). У подсолнечного жмыха математическое ожидание и дисперсия меняются несистемно, а зависимость $As(W)$ имеет максимум при влажности 13–15 %. Эксцесс до влажности 15 % не меняется, а затем начинает падать почти в 1,5 раза. Однако, к сожалению, данные зависимости вряд ли могут быть использованы для определения влажности жмыха.

Таблица 1

Интегральные потоки фотолюминесценции жмыхов различной влажности

W, %	Ф ± ΔФ, о. е., при $\lambda_в$, нм			
	Соевый жмых			
	282	365	388	428
5,8	207 ± 17	1118 ± 61	1520 ± 72	1760 ± 76
8,1	185 ± 6	1019 ± 22	1367 ± 30	1565 ± 36
9,4	175 ± 12	981 ± 37	1338 ± 35	1550 ± 41
11,9	172 ± 8	1001 ± 40	1395 ± 48	1691 ± 49
13,8	169 ± 8	948 ± 40	1286 ± 53	1501 ± 61
15,5	139 ± 5	827 ± 22	1147 ± 26	1375 ± 37
	Подсолнечный жмых			
	382		424	
8,2	290 ± 16		110 ± 7	
10,3	257 ± 11		104 ± 5	
13,0	206 ± 11		92 ± 5	
14,7	221 ± 10		92 ± 7	
16,3	191 ± 11		80 ± 10	
19,1	148 ± 11		66 ± 5	

Table 1

Integral photoluminescence fluxes of cakes of different humidity

W, %	*Ф ± ΔФ, r. u., at λ_e, nm*			
	Soy cake			
	282	*365*	*388*	*428*
5.8	*207 ± 17*	*1118 ± 61*	*1520 ± 72*	*1760 ± 76*
8.1	*185 ± 6*	*1019 ± 22*	*1367 ± 30*	*1565 ± 36*
9.4	*175 ± 12*	*981 ± 37*	*1338 ± 35*	*1550 ± 41*
11.9	*172 ± 8*	*1001 ± 40*	*1395 ± 48*	*1691 ± 49*
13.8	*169 ± 8*	*948 ± 40*	*1286 ± 53*	*1501 ± 61*
15.5	*139 ± 5*	*827 ± 22*	*1147 ± 26*	*1375 ± 37*
	Sunflower cake			
	382		*424*	
8.2	*290 ± 16*		*110 ± 7*	
10.3	*257 ± 11*		*104 ± 5*	
13.0	*206 ± 11*		*92 ± 5*	
14.7	*221 ± 10*		*92 ± 7*	
16.3	*191 ± 11*		*80 ± 10*	
19.1	*148 ± 11*		*66 ± 5*	

Таблица 2

Статистические параметры синхронных спектров возбуждения жмыхов различной влажности

W, %	M_λ, нм	σ^2	*As*	*Ex*
Соевый жмых				
5,8	417	3114	0,110	0,516
8,1	417	3042	0,115	0,533
9,4	419	3044	0,116	0,539
11,9	423	2972	0,183	0,520
13,8	419	3083	0,102	0,545
15,5	423	2955	0,217	0,538
Подсолнечный жмых				
8,2	401	2028	0,835	2,033
10,3	405	1987	1,040	2,040
13,0	406	2059	1,187	2,024
14,7	408	1976	1,158	2,071
16,3	405	2173	0,906	1,829
19,1	410	2406	0,565	1,422

Table 2

Statistical parameters of synchronous excitation spectra of cakes of different humidity

W, %	*M_1, nm*	*σ^2*	*As*	*Ex*
Soy cake				
5.8	*417*	*3114*	*0.110*	*0.516*
8.1	*417*	*3042*	*0.115*	*0.533*
9.4	*419*	*3044*	*0.116*	*0.539*
11.9	*423*	*2972*	*0.183*	*0.520*
13.8	*419*	*3083*	*0.102*	*0.545*
15.5	*423*	*2955*	*0.217*	*0.538*
Sunflower cake				
8.2	*401*	*2028*	*0.835*	*2.033*
10.3	*405*	*1987*	*1.040*	*2.040*
13.0	*406*	*2059*	*1.187*	*2.024*
14.7	*408*	*1976*	*1.158*	*2.071*
16.3	*405*	*2173*	*0.906*	*1.829*
19.1	*410*	*2406*	*0.565*	*1.422*

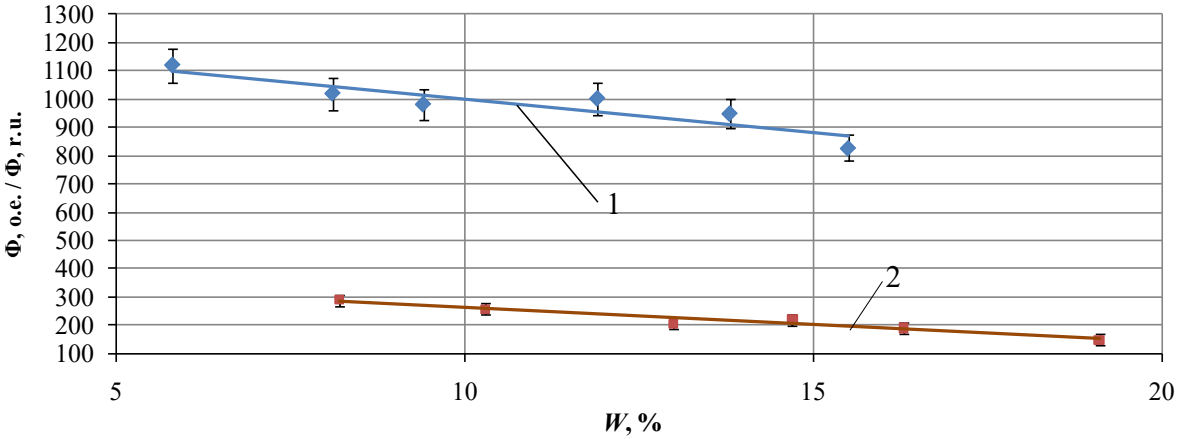

Рис. 4. Зависимость потоков фотолюминесценции от влажности жмыхов: 1 – соевого, 2 – подсолнечного
Fig. 4. Dependence of photoluminescence fluxes on the moisture content of cakes: 1 – soy, 2 – sunflower

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Из вышеизложенного следует, что для определения влажности жмыхов следует использовать зависимости потоков $\Phi_{365}(W)$ для соевого и $\Phi_{382}(W)$ для подсолнечного (рис. 4).

Для растительных кормов различной влажности изменение потока фотолюминесценции вызвано тушением люминесценции за счет изменения концентрации механически связанной (свободной) влаги в приповерхностных тканях. *Статическое тушение* обусловлено образованием нелюминесцирующего продукта в результате взаимодействия люминофора с тушителем. Если поглощение люминофора и комплекса одинаково, то можно записать:

$$\frac{\eta}{\eta_Q} = 1 + \beta Q, \qquad (2)$$

где η – выход люминесценции в отсутствии тушителя;

η_Q – выход люминесценции в присутствии тушителя (воды);

β – константа устойчивости нелюминесцирующего комплекса;

Q – концентрация молекул тушителя (воды).

То есть экспериментально подтверждена обратно пропорциональная зависимость параметров возбуждения (и зависящей от него люминесценции) от содержания влаги.

Методика фотолюминесцентного контроля влажности жмыхов включает в себя (рис. 5):

– возбуждение люминесценции излучением 365 нм для соевого или 382 нм для подсолнечного жмыха;

– регистрацию фотолюминесцентного потока излучения в диапазонах 410–600 нм или 430–600 нм;

– преобразование полученного фотосигнала (потока Ф) в пропорциональный ему электрический сигнал U и его усиление;

– определение значения влажности на основе установленных зависимостей $\Phi_{365}(W)$ для соевого и $\Phi_{382}(W)$ для подсолнечного жмыхов и полученных градуировочных характеристик $W(\Phi)$.

При дальнейшей приборной реализации с учетом близости для обоих видов жмыхов длин волн возбуждения и диапазонов регистрации фотолюминесценции возможна унификация оптико-электронных компонентов – источников и приемников излучения.

Рис. 5. Методика фотолюминесцентного определения влажности жмыхов

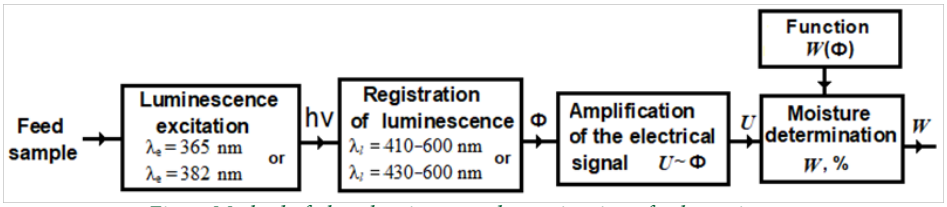

Fig. 5. Method of photoluminescent determination of cake moisture

Таким образом, на основе полученных зависимостей потоков фотолюминесценции от содержания влаги в соевом и подсолнечном жмыхах предложена методика контроля влажности, входящая в разрабатываемое новое оборудование для определения питательной ценности кормов. Это даст возможность дальнейшей разработки оптического портативного прибора, который будет базироваться на новой световой технологии и обеспечит быстродействие и точность проводимых измерений.

Перспективность подобных решений будет актуальна для специалистов в области кормления животных для быстрой оценки качества корма, для специалистов в области продажи кормовых добавок – для расчета базового рациона в хозяйстве, а также при проведении кормозаготовки, где нужно контролировать влажность кормового сырья и вносить при необходимости корректировки.

Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на получение оптических калибровок, которые характеризуют другие показатели питательной ценности (содержание жира, клетчатки, крахмала и протеина) в кормах различного происхождения. Ключевой сложностью реализации подобного метода является получение корреляционных связей, которые характеризуют питательную ценность корма на основе регистрируемых входных параметров люминесценции.

Помимо корреляционных связей, основополагающим фактором создания новой приборной базы являются расчет параметров и характеристик используемых электронных компонентов, тип вычислителя и конструктивные параметры корпуса.

Библиографический список

1. Курдоглян А. А., Кармацких Ю. А., Костомахин Н. М. Эффективность использования подсолнечного жмыха и нестандартных семян подсолнечника при раздое коров // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2019. № 7. С. 23–37.

2. Гамко Л. Н., Менякина А. Г., Подольников В. Е. Стратегия кормления лактирующих коров в период раздоя в условиях сельскохозяйственных предприятий // Вестник Брянской ГСХА. 2021. № 3 (85). С. 21–26. DOI: 10.52691/2500-2651-2021-85-3-21-26.

3. Buryakov N. P., Aleshin D. E., Buryakova M. A. Influence of using various levels of protein concentrate in rations of Ayrshire dairy cows on rumen microbiome, reproductive traits and economic efficiency // Veterinary Sciences. 2022. No. 9 (10). Article number 534. DOI: 10.3390/vetsci9100534.

4. Кандроков Р. Х., Поречная Е. С., Смирнова А. Р. Переработка соевого шрота и жмыха в муку и отруби // Вестник АПК Верхневолжья. 2022. № 4 (60). С. 92–99. DOI: 10.35694/YARCX.2022.60.4.011.

5. Goiri I., Zubiria I., Lavín J. L., Benhissi H. Evaluating the inclusion of cold-pressed rapeseed cake in the concentrate for dairy cows upon ruminal biohydrogenation process, ruminal microbial community and milk production and acceptability // Animals. 2021. No. 11 (9). Article number 2553. DOI: 10.3390/ani11092553.

6. Овчинников А., Засыпкин Ю. Соевый жмых в рационах молодняка КРС // Комбикорма. 2010. № 1. С. 67–68.

7. Харитонов Е. Л. Сравнительные исследования использования соевого шрота и жмыха в рационах лактирующих коров в эквивалентных количествах по обменному протеину // Молочное и мясное скотоводство. 2018. № 2. С. 17–20.

8. Доморощенкова М. Л., Крылова И. В., Кандроков Р. Х. Исследование продуктов переработки подсолнечного шрота и жмыха, полученных механическим способом // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института жиров. 2020. № 1-2. С. 30–36. DOI: 10.25812/VNIIG.2020.90.41.022.

9. Zubiria I., Garcia-Rodriguez A., Atxaerandio R., Ruiz R. Effect of Feeding Cold-Pressed Sunflower Cake on Ruminal Fermentation, Lipid Metabolism and Bacterial Community in Dairy Cows // Animals. 2019. No. 9 (10). Article number 755. DOI: 10.3390/ani9100755.

10. Усенко В. В., Филева Н. С., Ланге Р. Ф. Результаты анализа базового рациона коров молочного стада // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2024. № 1 (51). С. 86–100.

11. Рядчиков В. Г., Солдатов А. А., Харитонов Е. Л., Шляхова О. Г., Тантави А., Комарова Н. С. Распадаемость кормового белка – важный фактор эффективности использования азота и молочной продуктивности лактирующих коров // Эффективное животноводство. 2019. № 3 (151). С. 42–48.

12. Латыпова Э. Х., Миронова И. В. Влияние витаминно-минеральных добавок в рационе кормления крупного рогатого скота на качество молока и молочных продуктов // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4 (52). С. 42–47. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-10-194-201.

13. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 3. Кормовая продукция от переработки зернового сырья // Ветеринария сегодня. 2020. № 3 (34). С. 213–219. DOI: 10.29326/2304-196X-2020-3-34-213-219.

14. Иванов Ю. А., Булатов С. Ю., Тареева О. А. Применение метода цветовой сегментации в задаче определения однородности кормосмеси // Техника и технологии в животноводстве. 2024. № 1 (14). С. 54–63. DOI: 10.22314/27132064-2024-1-54.

15. Беляков М. В., Павкин Д. Ю., Никитин Е. А., Ефременков И. Ю. Обоснование выбора спектральных диапазонов фотолюминесцентного контроля состава и питательной ценности кормов // Техника и оборудование для села. 2023. № 2 (308). С. 31–36. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-2-31-36.

16. Qin Y., Li J., Kuang J., et al. Okadaic acid detection through a rapid and sensitive amplified luminescent proximity homogeneous assay // Toxins. 2023. Vol. 15, No. 501. DOI: 10.3390/toxins15080501.

17. Zhang D., Wang Z., Jin N. et al. Evaluation of efficacy of fungicides for control of wheat fusarium head blight based on digital imaging // IEEE Access. 2020. No. 8. Pp. 109876–109890. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001652.

18. Sanjay M., Kalpana B. Early Mass Diagnosis of Fusarium Wilt in Banana Cultivations using an E-Nose Integrated Autonomous Rover System // International Journal of Applied Sciences and Biotechnology. 2017. Vol. 5, No. 2. Pp. 261–266. DOI: 10.3126/ijasbt.v5i2.17621.

19. Giménez-Gallego J., González-Teruel J. D., Soto-Valles F. Intelligent thermal image-based sensor for affordable measurement of crop canopy temperature // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 188. Article number 106319. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106319.

20. Umberto M., Francesca V. Multi-task learning for multi-dimensional regression: application to luminescence sensing // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, No. 22. Article number 4748. DOI: 10.3390/app9224748.

Об авторах:

Михаил Владимирович Беляков, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия; ORCID 0000-0002-4371-8042, AuthorID 745187.
E-mail: bmw20100@mail.ru

Евгений Александрович Никитин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия; ORCID 0000-0003-0918-2990, AuthorID 960848.
E-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru

Денис Сергеевич Пятченков, специалист лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия; ORCID 0000-0002-5903-6142, AuthorID 1209190. *E-mail: denis.piat@yandex.ru*

Дмитрий Андреевич Благов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия; ORCID 0000-0001-7826-5197, AuthorID 970113.
E-mail: aspirantyra2013@gmail.com

References

1. Kurdoglyan A. A., Karmatskikh Yu. A., Kostomakhin N. M. The effectiveness of the use of sunflower presscake and substandard sunflower seeds in the period of increasing the milk yield. *Feeding of Agricultural Animals and Feed Production.* 2019; 7: 23–37. (In Russ.)

2. Gamko L. N., Menyakina A. G., Podol′nikov V. E. Strategy of feeding lactating cows during the breeding season in agricultural enterprises. *Bulletin of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2021; 3 (85): 21–26. DOI: 10.52691/2500-2651-2021-85-3-21-26. (In Russ.)

3. Buryakov N. P., Aleshin D. E., Buryakova M. A. Influence of using various levels of protein concentrate in rations of Ayrshire dairy cows on rumen microbiome, reproductive traits and economic efficiency. *Veterinary Sciences*. 2022; 9 (10): 534. DOI: 10.3390/vetsci9100534.

4. Kandrokov R. Kh., Porechnaya E. S., Smirnova A. R. Processing of soybean meal and cake into flour and bran. *Bulletin of the Agro-Industrial Complex of the Upper Volga Region*. 2022; 4 (60): 92–99. DOI: 10.35694/YARCX.2022.60.4.011. (In Russ.)

5. Goiri I., Zubiria I., Lavín J. L., Benhissi H. Evaluating the inclusion of cold-pressed rapeseed cake in the concentrate for dairy cows upon ruminal biohydrogenation process, ruminal microbial community and milk production and acceptability. *Animals.* 2021; 11 (9): Article number 2553. DOI: 10.3390/ani11092553.

6. Ovchinnikov A., Zasypkin Yu. Soy cake in the rations of young cattle. *Compound Feed*. 2010; 1: 67–68. (In Russ.)

7. Kharitonov E. L. Comparative studies of the use of soybean meal and oil cake in the diets of lactating cows in equivalent amounts of metabolic protein. *Dairy and Beef Cattle Breeding*. 2018; 2: 17–20. (In Russ.)

8. Domoroshchenkova M. L., Krylova I. V., Kandrokov R. Kh. Investigation of processed products of sunflower meal and oil cake obtained by mechanical method. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*. 2020; 1-2: 30–36. DOI: 10.25812/VNIIG.2020.90.41.022. (In Russ.)

9. Zubiria I., Garcia-Rodriguez A., Atxaerandio R., Ruiz R. Effect of Feeding Cold-Pressed Sunflower Cake on Ruminal Fermentation, Lipid Metabolism and Bacterial Community in Dairy Cows. *Animals*. 2019; 9 (10): 755. DOI: 10.3390/ani9100755.

10. Usenko V. V., Fileva N. S., Lange R. F. The results of the analysis of the basic diet of dairy cows. *Bulletin of the Don State Agrarian University*. 2024; 1 (51): 86–100. (In Russ.)

11. Ryadchikov V. G., Soldatov A. A., Kharitonov E. L., Shlyakhova O. G., Tantavi A., Komarova N. S. The degradation of feed protein is an important factor in the efficiency of nitrogen use and dairy productivity of lactating cows. *Efficient Animal Husbandry*. 2019; 3 (151): 42–48. (In Russ.)

12. Latypova E. Kh., Mironova I. V. The effect of vitamin and mineral supplements in the diet of cattle on the quality of milk and dairy products. *Machinery and Technologies in Animal Husbandry*. 2023; 4 (52): 42–47. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-10-194-201. (In Russ.)

13. Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova E. V. Mycotoxicological monitoring. Message 3. Feed products from the processing of grain raw materials. *Veterinary medicine today*. 2020; 3 (34): 213–219. DOI: 10.29326/2304-196X-2020-3-34-213-219. (In Russ.)

14. Ivanov Yu. A., Bulatov S. Yu., Tareeva O. A. Application of the color segmentation method in the task of determining the uniformity of the feed mixture. *Machinery and Technologies in Animal Husbandry*. 2024; 1 (14): 54–63. DOI: 10.22314/27132064-2024-1-54. (In Russ.)

15. Belyakov M. V., Pavkin D. Yu., Nikitin E. A., Efremenkov I. Yu. Justification of the choice of spectral ranges for photoluminescent control of feed composition and nutritional value. *Machinery and Equipment for the Village*. 2023; 2 (308): 31–36. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-2-31-36. (In Russ.)

16. Qin Y., Li J., Kuang J., et al. Okadaic acid detection through a rapid and sensitive amplified luminescent proximity homogeneous assay. *Toxins*. 2023; 15 (501). DOI: 10.3390/toxins15080501.

17. Zhang D., Wang Z., Jin N., et al. Evaluation of efficacy of fungicides for control of wheat fusarium head blight based on digital imaging. *IEEE Access*. 2020; 8: 109876–109890. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001652.

18. Sanjay M., Kalpana B. Early mass diagnosis of fusarium wilt in banana cultivations using an e-nose integrated autonomous rover system. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*. 2017; 5 (2): 261–266. DOI: 10.3126/ijasbt.v5i2.17621.

19. Giménez-Gallego J., González-Teruel J. D., Soto-Valles F. Intelligent thermal image-based sensor for affordable measurement of crop canopy temperature. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021; 188: 106319. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106319.

20. Umberto M., Francesca V. Multi-task learning for multi-dimensional regression: application to luminescence sensing. *Applied Sciences.* 2019; 9 (22): 4748. DOI: 10.3390/app9224748.

Authors' information:

Mikhail V. Belyakov, doctor of technical sciences, chief researcher at the laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia; ORCID 0000-0002-4371-8042, AuthorID 745187. *E-mail: bmw20100@mail.ru*

Evgeniy A. Nikitin, candidate of technical sciences, senior researcher at the laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia; ORCID 0000-0003-0918-2990, AuthorID 960848. *E-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru*

Denis S. Pyatchenkov, specialist of the laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia;
ORCID 0000-0002-5903-6142, AuthorID 1209190. *E-mail: denis.piat@yandex.ru*

Dmitriy A. Blagov, candidate of biological sciences, senior researcher at the laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia; ORCID 0000-0001-7826-5197, AuthorID 970113. *E-mail: aspirantyra2013@gmail.com*