

Эффективность фотолюминесцентного метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве

Михаил Владимирович Беляков¹,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: bmw20100@mail.ru;

Евгений Александрович Никитин¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru;
Игорь Юрьевич Ефременков²,
бакалавр, e-mail: matiusharius@mail.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Смоленск, Российская Федерация

Реферат. Провели анализ спектральных систем оценки для контроля гомогенности кормовых смесей. (*Цель исследования*) Изучить оптические люминесцентные свойства основных составляющих кормовых смесей в ультрафиолетовом и видимом диапазонах и разработать методику фотолюминесцентного контроля их качества. (*Материалы и методы*) Исследовали две группы компонентов кормовой смеси: гранулированный комбикорм и кукурузный силос. Спектральные характеристики измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама». Установили спектры возбуждения при синхронном сканировании и на их основе определили спектры фотолюминесценции по ранее апробированной методике. (*Результаты и обсуждение*) В спектрах возбуждения компонентов выявили основные максимумы, соответствующие длине 362 нанометра и 424 нанометра. Определили, что все характеристики фотолюминесценции одномодальные, а измеренные кривые для каждой длины волны возбуждения качественно схожи, но различаются количественно: например, различие потоков комбикорма и светлого силоса составляет 2,4 раза при длине 232 нанометра, 2,8 раза – при 424 и 3,8 раза – при 362 нанометрах. Рекомендовали использовать для возбуждения опытной пробы кормосмеси излучение длины волны 362 нанометра, а фотолюминесценцию регистрировать в диапазоне 390-540 нанометров. Описали этапы методики экспресс-контроля качества смешивания: начальная градуировка по люминесценции комбикорма, пробоподготовка, возбуждение люминесценции смеси, регистрация потока люминесценции, усиление фотосигнала и его обработка по алгоритмам диагностики, после чего следует либо кормораздача, либо продолжение смешивания с повторным экспресс-контролем. (*Выводы*) Предложили методику оценки качества смешивания компонентов кормовой смеси, которая может быть реализована с помощью компактного спектрального прибора. Выявили, что использование предлагаемого метода в технологическом процессе приготовления кормовой смеси позволит снизить энергетические затраты на смешивание кормов. **Ключевые слова:** кормление крупного рогатого скота, гомогенность кормовых смесей, экспресс-контроль качества смешивания кормов, спектр возбуждения, спектр люминесценции, поток излучения.

■ Для цитирования: 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 FKFXWJ.

Efficiency of the Photoluminescent Method for Monitoring the Homogeneity of Feed Mixtures in Animal Husbandry

Mikhail V. Belyakov¹,
Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,
e-mail: bmw20100@mail.ru;

Evgeniy A. Nikitin¹,
junior researcher, e-mail: evgeniy.nicks@yandex.ru;
Igor Yu. Efremenkov²,
bachelor's student, e-mail: matiusharius@mail.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Russian Federation

Abstract. The spectral evaluation systems for controlling the feed mixtures homogeneity were analyzed. (*Research purpose*) To study the optical luminescent properties of the feed mixtures main components in the ultraviolet and visible range and develop a method for their photoluminescent quality control. (*Materials and methods*) Two groups of feed mixture components were studied:

granular compound feed and corn silage. The spectral characteristics were measured by Fluorat-02-Panorama spectrofluorimeter. The synchronous scanning helped to identify the excitation spectra and, on their basis, the photoluminescence spectra were determined according to a previously tested technique. (*Results and discussion*) The components excitation spectra revealed the main maxima of 362 nanometers and 424 nanometers. All the photoluminescence characteristics proved to be single-modal, for each excitation wavelength, the measured curves are qualitatively similar, but differ quantitatively: for example, the difference in the compound feed and light silage flows is 2.4 times at a length of 232 nanometers, 2.8 times at 424 nanometers and 3.8 times at 362 nanometers. It is advisable to use 362-nanometer wavelength radiation to excite the experimental sample of the feed mixture, and to record photoluminescence within the range of 390-540 nanometers. The method of express quality control of mixing includes the following stages: initial calibration by the compound feed luminescence, sample preparation, mixture luminescence excitation, the luminescence flux registration, photo signal amplification and processing according to diagnostic algorithms, followed by either feed distribution or sequel mixing with repeated express control. (*Conclusions*) The proposed method for assessing the quality of mixing the feed mixture components can be implemented using a compact spectral device. It was found that the use of the proposed method in the technological process of preparing the feed mixture will reduce the energy costs.

Keywords: cattle feeding, feed mixtures homogeneity, express control of the feed mixing quality, excitation spectrum, luminescence spectrum, radiation flux.

■ **For citation:** Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremkov I.Yu. Effektivnost' fotolyuminestsentnogo metoda kontrolya gomogennosti kormovykh smesey v zhivotnovodstve [Efficiency of the photoluminescent method for monitoring the homogeneity of feed mixtures in animal husbandry]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 55-61 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61. EDN FKFXWJ.

Процесс кормления сельскохозяйственных животных формируется из длинной цепочки последовательных технологических операций, выполняемых механизированными средствами, роботами, а также непосредственно человеком [1].

Контроль качества кормов, получаемых путем естественного выращивания (зеленая масса свежескошенной травы, сенаж, кукурузный силос и пр.), осуществляют несколькими способами. Классические методы «мокрой химии» включают отбор проб, пробоподготовку (измельчение, сушку и пр.), лабораторный анализ содержания протеина, жира, углеводов, сухого вещества, нейтрально- и кислотно-детергентной клетчатки. В последние 3 года среди коммерческих решений наибольшее распространение получают портативные анализаторы питательности кормов, такие как *Aurora NIR* или *Dinamica Generale* с автономной аккумуляторной системой. Их действие основано на сканировании спектральных характеристик заготавливаемого кормового сырья в полевых условиях [2-3]. Приборная база, основанная на спектрометрии отражения ближнего инфракрасного диапазона, достаточно функциональна. Подобные методы распространены в других индустриях, где необходимо отслеживать эффективность конвейерного производства, контролировать гомогенность потока порошкообразных смесей [4-5].

К недостаткам спектральных приборов стоит отнести ограниченность функционала, обусловленную возможностью использования только в специализированных помещениях. В летнее время интенсивность солнечного излучения может существенно повлиять на достоверность показателей спектрального анализа [6].

Применительно к кормлению крупного рогатого скота на животноводческих комплексах стоит отметить, что анализ питательности компонентов рациона – это лишь предварительные работы, направленные на составление рецепта полнорационных кормовых смесей. Гораздо важнее знать, что получает животное непосредственно на кормовом столе [7-9].

Проблема заключается в отсутствии автоматизированных систем, которые могли бы в режиме реального времени отслеживать эффективность смешивания кормовых смесей и выдавать рекомендации по режиму работы смесителей, тем самым обеспечивая энергоэффективность кормосмесителя, в том числе для роботизированных машин, работающих от аккумуляторных батарей [9, 10].

Ключевым индикатором питательности кормовой смеси выступает показатель сухого вещества. В кормах естественного происхождения высокий уровень влажности – до 70%. Чтобы сбалансировать содержание сухого вещества и повысить энергетическую ценность, вводят различные концентрированные комбикорма с уровнем влажности до 14%. При смешивании общий показатель сухого вещества в рационе составляет около 50% [11-13].

Отсутствие автоматических систем мониторинга однородности получаемого в смесителях рациона не позволяет контролировать качество смешивания, что может негативно сказаться на продуктивности и здоровье животных. Рацион должен быть сбалансирован и представлять собой однородную, многокомпонентную, гомогенную смесь [14-17].

Важно учитывать также влияние технологического оборудования для приготовления кормов на ферме. Например, на двух идентичных животноводче-



ских комплексах с равноценным генетическим потенциалом поголовья и рационом кормления разница в удоях может составить 2,7% [18]. Одну ферму обслуживал прицепной миксер-раздатчик кормов, на другой ферме использовалась самоходная машина с системой самозагрузки.

Мы предложили использовать фотолюминесцентный метод для контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве – на примере экспериментальной проверки спектральных характеристик кукурузного силоса и комбикорма.

Цель исследования – изучить оптические люминесцентные свойства основных составляющих кормовых смесей в ультрафиолетовом и видимом диапазонах и разработать методику фотолюминесцентного контроля их качества.

Материалы и методы. В качестве компонентов кормовой смеси использовали концентрированные и объемистые корма. Первая группа представлена гранулированным комбикормом: размол пшеницы, размол кукурузы, шрот соевый, жмых рапсовый, влажность 13,5%. Вторая – кукурузным силосом урожая 2021 г. (Московская область), влажностью 69%.

Элементы кукурузного силоса разделили на две фракции:

- первая – светло-желтая стебельчатая часть;
- вторая – ярко-зеленая листовая часть.

Спектральные характеристики измеряли на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (рис. 1). Прибор соединен со светозащитной камерой системой кварцевых световодов и управляется от персонального компьютера с программным обеспечением *Panorama Pro*.

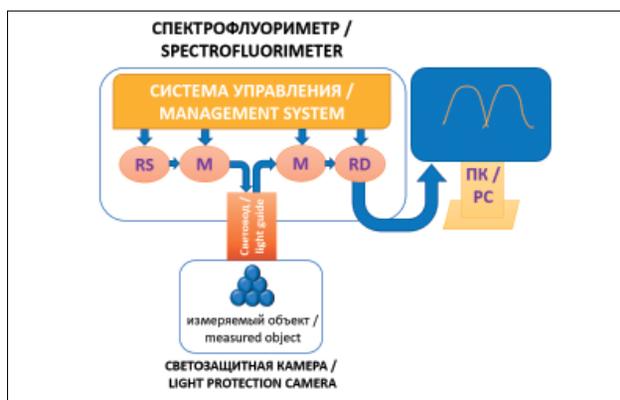


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки: RS – источник излучения; M – дифракционные монохроматоры; RD – приемник излучения

Fig. 1. Schematic diagram of the measuring unit: RS is the radiation source; M – diffraction monochromators; RD – radiation receiver

По ранее апробированной методике измерили спектры возбуждения (поглощения) $\eta_s(\lambda)$ при синхронном сканировании и на их основе – спектры люминесценции $\varphi_n(\lambda)$ (рис. 2) [19].



Рис. 2. Измерение спектров фотолюминесценции
Fig. 2. Measuring the photoluminescence spectra

Синхронное сканирование предполагает одновременную перестройку монохроматоров каналов возбуждения и регистрации люминесценции при фиксированной величине их смещения, желательного близкой к стоксову сдвигу. В этом случае получается максимальная величина сигнала. По результатам измерений провели статистическую обработку, в том числе усреднение по 50 спектрам. В программе *Panorama Pro* вычислили интегральные параметры спектров H и Φ :

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

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

где H – интегральная поглощательная способность, отн.е. (относительные единицы);

$\eta_s(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения, отн.е./нм;

$\lambda_1 \dots \lambda_2$ – границы рабочего спектрального диапазона возбуждения, нм;

Φ – поток фотолюминесценции, отн.е.;

$\varphi_n(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции, отн.е./нм;

$\lambda_3 \dots \lambda_4$ – границы рабочего спектрального диапазона фотолюминесценции, нм.

Результаты и обсуждение. Визуальный анализ показывает, что гранулы комбикорма оптически более однородны, чем силос, составные части которого имеют различные оттенки – от белесого до зелено-коричневого цвета. Было принято решение измерять спектры комбикорма как единого объекта, а в силосе разделить его фракции, отобрав визуально наиболее темные (как правило, листья) и наиболее светлые (как правило, сердцевинки стеблей). Остальные фракции по оптическим свойствам занимают промежуточное положение.

Качественно все спектры схожи. В них присутствуют небольшие пики с максимумами – 232 нм; 274; 485 и 528 нм. Основные максимумы приходятся на 362 и 424 нм, которые наряду с 232 и 485 нм отмечались ранее у большинства семян зерновых, зернобобовых и овощных растений [19-22]. Наиболее высокие и ярко выраженные пики соответствуют 232; 362 и 424 нм (рис. 3). Для количественной оценки отличия спектральных свойств возбуждения комбикорма

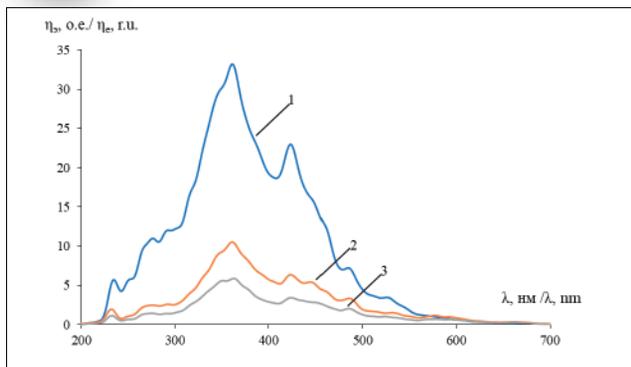


Рис. 3. Спектральные характеристики возбуждения: 1 – комбикорма, 2 – силоса светлого, 3 – силоса темного

Fig. 3. Spectral characteristics of excitation: 1 – compound feed, 2 – light silage, 3 – dark silage

и силоса по формуле (1) рассчитали интегральные поглощательные способности как во всем спектральном диапазоне, так и в отдельных его частях: 210-240 нм – для пика 232 нм, 300-410 нм – для пика 362 нм и 410-470 нм – для пика 424 нм (табл. 1).

Различие интегральных поглощательных способ-

Таблица 1 Table 1				
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОМБИКОРМА И РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ СИЛОСА INTEGRAL PARAMETERS OF THE EXCITATION SPECTRA FOR COMPOUND FEED AND VARIOUS SILAGE FRACTIONS				
Виды корма Types of feed	Спектральный диапазон, нм Spectral range, nm			
	полный full	210-240	300-410	410-470
Комбикорм Compound feed	3957	73	2363	1202
Силос светлый Light silage	1715	27	690	362
Силос темный Dark silage	497	17	396	199

ностей комбикорма и светлой части силоса довольно значительно – 2,3 раза для всего спектра, в диапазоне 210-240 нм – в 2,7 раза, в диапазоне 300-410 нм – в 3,4 раза, в диапазоне 410-470 нм – в 3,3 раза. Между светлой и темной фракциями силоса отличие составляет 3,4 раза для всего спектра, а для его частей – 1,6-1,8 раза.

На следующем этапе измерили спектральные характеристики фотолюминесценции при возбуждении излучением с длиной волн 232 нм, 362 и 424 нм (рис. 4).

Как видим, все полученные характеристики одно-модальные. Для каждой длины волны возбуждения измеренные кривые качественно схожи, но различаются количественно. По формуле (2) вычислили интегральные потоки фотолюминесценции Φ_λ для различных длин волн возбуждения (табл. 2).

Различие люминесцентных потоков светлых и темных фракций силоса составляет 2,3 раза, комбикорма и светлого силоса – 2,4-3,8 раза. С учетом того, что

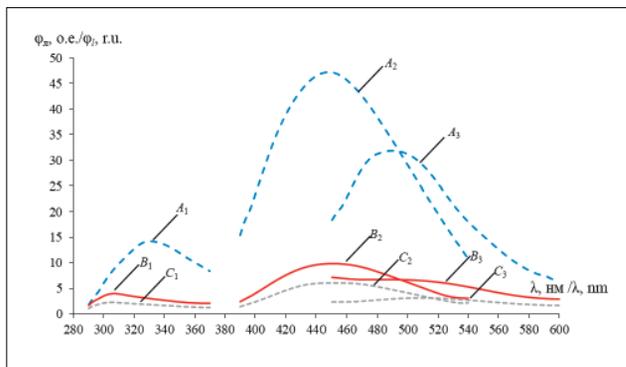


Рис. 4. Спектральные характеристики фотолюминесценции: комбикорма (A_1, A_2, A_3), силоса светлого (B_1, B_2, B_3) и силоса темного (C_1, C_2, C_3) в диапазонах 232 нм, 362 и 424 нм соответственно

Fig. 4. Spectral characteristics of photoluminescence for compound feed (A_1, A_2, A_3), light silage (B_1, B_2, B_3) and dark silage (C_1, C_2, C_3) in the ranges of 232 nm, 362 and 424 nm, respectively

Таблица 2 Table 2			
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОМБИКОРМА И РАЗЛИЧНЫХ СИЛОСНЫХ ФРАКЦИЙ INTEGRAL PARAMETERS OF THE LUMINESCENCE SPECTRA OF COMPOUND FEED AND VARIOUS SILAGE FRACTIONS			
Виды корма Types of feed	Длина волны возбуждения, нм Excitation wavelength, nm		
	232	362	424
Комбикорм Compound feed	819	4620	2519
Силос светлый Light silage	347	1204	901
Силос темный Dark silage	150	525	390

силос будет состоять из смешанных фракций, то соотношение потоков вырастет до 6-8 раз. Таким образом целесообразно использовать для возбуждения опытной пробы кормосмеси излучение длины волны 362 нм, а фотолюминесценцию регистрировать в диапазоне 390-540 нм.

Методику экспресс-контроля качества смешивания можно представить схематично (рис. 5):

1. Первоначально проводят градуировку путем измерения напряжения U_0 при регистрации потока фотолюминесценции от чистого комбикорма. Последующую градуировку осуществляют по мере необходимости, например при замене комбикорма на другой вид.

2. Затем опытную пробу смеси кормов помещают в темную светонепроницаемую камеру. Возможно встраивание процесса экспресс-диагностики в технологические процессы кормораздачи для непрерывного контроля ее эффективности.

3. Следующий шаг – возбуждение фотолюминесценции компонентов корма излучением узкого спектрального диапазона с максимумом $\lambda=362$ нм в течение 20 мкс.

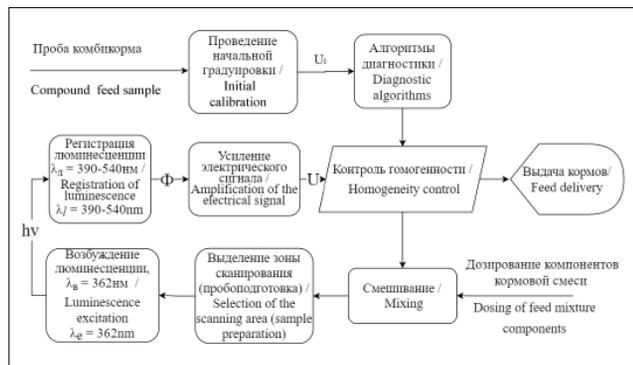


Рис. 5. Методика экспресс-контроля качества смешивания
 Fig. 5. The method for the express control of mixing quality

4. Регистрируется сигнал, пропорциональный потоку фотолюминесценции Φ в спектральном диапазоне 390-540 нм. Процесс происходит 2-3 с с усреднением результата.

5. Полученный фотосигнал (фотонапряжение U , фототок I), пропорциональный потоку Φ , проходит через усилитель и поступает в микропроцессор, где обрабатывается с учетом имеющегося в его памяти исходного значения U_0 по соответствующим алгоритмам диагностики.

6. По результатам определения качества смешивания принимается решение о дальнейших действиях: кормораздача или продолжение смешивания с повторным экспресс-контролем.

Несмотря на то, что люминесцентные характеристики силоса и комбикорма качественно схожи, имеется возможность анализа качества смешивания кормов по величине потока фотолюминесценции на основе априорно полученных данных. Такая методика экспресс-контроля включает возбуждение на 362 нм и регистрацию фотолюминесценции в диапазоне 390-540 нм с последующим сравнением фотосигнала с сигналом чистого комбикорма и определением его доли в смеси.

Выводы

1. Предлагаемая методика оценки качества смешивания компонентов кормовой смеси может быть реализована в виде компактного спектрального прибора и вычислителя с программным обеспечением для автоматизированной обработки и интерпретации спектров фотолюминесценции в диапазоне 390-540 нм.
2. Использование предлагаемого метода в технологическом процессе приготовления кормовой смеси позволит снизить энергетические затраты на вращение смешивающего рабочего органа в миксере-раздатчике, при сохранении качества смешивания.
3. Сформированный задел теоретических и экспериментальных основ позволит реализовать более надежные и точные технологические решения, выступающие в качестве датчика обратной связи в автоматизированных и роботизированных машинах по приготовлению многокомпонентных смесей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shurygin B., Solovchenko A., Chivkunova O., Solovchenko O., Dorokhov A., Smirnov I., Khort D., Astashev M.E. Comparison of the non-invasive monitoring of fresh-cut lettuce condition with imaging reflectance hyperspectrometer and imaging pam-fluorimeter. *Photonics*. 2021. 8(10). 425.
2. Burmistrov D.E., Ignatenko D.N., Lednev V.N., Gudkov S.V., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Nikitin E.A., Lobachevsky Y.P., Zvyagin A.V. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021. 8(12). 551.
3. Fountas S., Carli G., Sorensen C.G., Tsiropoulos Z., Cavalaris C., Vatsanidou A., Liakos B., Canavari M., Wiebensohn J., Tisserye B. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and electronics in agriculture*. 2015. 115. 40-50.
4. Дорохов А.С., Бельшикина М.Е. Агроклиматическая характеристика регионов нечерноземной зоны российской федерации и оценка пригодности для возделывания современных раннеспелых сортов сои // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. N3(55). С. 34-39.
5. Zi L., Cong X., Peng Y., Chen X. RGB-D Saliency Object Detection Based on Adaptive Manifolds Filtering. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. 586. 174-181.
6. Bezen R., Edan Y., Halachmi I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 172. 105345.
7. Muller A.F., Rukin I., Falldorf C., Bergmann R.B. Multicolor Holographic Display of 3D Scenes Using Referenceless Phase Holography (RELPH). *Photonics*. 2021. 8(7). 247.
8. Zhou W.L., Yuan C.L. Model of Image Color Difference and Partial Based On RGB Color Distribution Measuring. *International journal of grid and distributed computing*. 2016. 9(8). 231-239.
9. Rego G., Ferrero F., Valledor M., Campo J.C., Forcada S., Royo L.J., Soldado A. A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 175. 105578.
10. Buza M.H., Holden L.A., White R.A., Ishler V.A. Evaluating the effect of ration composition on income over feed cost and milk yield. *Journal of dairy science*. 2014. 97(5). 3073-3080.
11. Bargo F., Muller L.D., Delahoy J.E., Cassidy T.W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of dairy science*. 2002. 85(7). 1777-1792.
12. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of dairy research*. 2019. 86(1). 34-39.
13. Krawczel P.D., Klaiber L.M., Thibeau S.S., Dann H.M. Tech-

- nical note: Data loggers are a valid method for assessing the feeding behavior of dairy cows using the Calan Broad-bent Feeding System. *Journal of dairy science*. 2012. 95(8). 4452-4456.
14. Самохвалов А.А., Вейко В.П., Леднев В.Н., Першин С.М., Федоров А.Н., Парфенов В.А., Кирцидели И.Ю., Щеголихин А.Н. Лазерная экспресс-диагностика микромицетов-биодеструкторов // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2017. №9. С. 71-77.
 15. Першин С.М., Брысев А.П., Гришин М.Я., Леднев В.Н., Бункин А.Ф., Клопотов Р.В. Реконструкция нелинейного профиля давления ультразвукового пучка в воде по сигналам лидара комбинационного рассеяния // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85. №6. С. 863-868.
 16. Yanykin D.V., Burmistrov D.E., Simakin A.V., Ermakova J.A., Gudkov S.V. Effect of up-converting luminescent nanoparticles with increased quantum yield incorporated into the fluoropolymer matrix on solanum lycopersicum growth. *Agronomy*. 2022. 12(1). 108.
 17. Sharapov M.G., Gudkov S.V., Lankin V.Z. Hydroperoxide-reducing enzymes in the regulation of free-radical processes. *Biochemistry (Moscow)*. 2021. 86(10). 1256-1274.
 18. Grinberg M.A., Balalaeva I.V., Gromova E., Sinitsyna Y., Sukhov V., Vodeneev V., Gudkov S.V. Effect of chronic β -Radiation on long-distance electrical signals in wheat and their role in adaptation to heat stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2021. 184. 104378.
 19. Bashilov A.M., Efremenko I.Y., Belyakov M.V., Lavrov A.V., Gulyaev A.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Boyko A.A. Determination of Main Spectral and Luminescent Characteristics of Winter Wheat Seeds Infected with Pathogenic Microflora. *Photonics*. 2021. 8. 494.
 20. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10. N22. 1-10.
 21. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6.
 22. Semenova N.A., Smirnov A.A., Grishin A.A., et al. The effect of plant growth compensation by adding silicon-containing fertilizer under light stress conditions. *Plants*. 2021. 10. N7. 1287.

REFERENCES

1. Shurygin B., Solovchenko A., Chivkunova O., Solovchenko O., Dorokhov A., Smirnov I., Khort D., Astashev M.E. Comparison of the non-invasive monitoring of fresh-cut lettuce condition with imaging reflectance hyperspectrometer and imaging pam-fluorimeter. *Photonics*. 2021. 8(10). 425 (In English).
2. Burmistrov D.E., Ignatenko D.N., Lednev V.N., Gudkov S.V., Pavkin D.Y., Khakimov A.R., Nikitin E.A., Lobachevsky Y.P., Zvyagin A.V. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021. 8(12). 551 (In English).
3. Fountas S., Carli G., Sorensen C.G., Tsiropoulos Z., Cavalari C., Vatsanidou A., Liakos B., Canavari M., Wiebensohn J., Tisserye B. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and electronics in agriculture*. 2015. 115. 40-50 (In English).
4. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Agroklimaticeskaya kharakteristika regionov nechernozemnoy zony rossiyskoy federatsii i otsenka prigodnosti dlya vozdeleyvaniya sovremennykh rannespelykh sortov soi [Agroclimatic characteristics of regions of the non-black soil zone of the russian federation and suitability estimation for cultivation of modern early soybean varieties]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2021. N3(55). 34-39 (In Russian).
5. Zi L., Cong X., Peng Y., Chen X. RGB-D Saliency Object Detection Based on Adaptive Manifolds Filtering. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. 586. 174-181 (In English).
6. Bezen R., Edan Y., Halachmi I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 172. 105345 (In English).
7. Muller A.F., Rukin I., Falldorf C., Bergmann R.B. Multicolor Holographic Display of 3D Scenes Using Referenceless Phase Holography (RELPH). *Photonics*. 2021. 8(7). 247 (In English).
8. Zhou W.L., Yuan C.L. Model of Image Color Difference and Partial Based On RGB Color Distribution Measuring. *International journal of grid and distributed computing*. 2016. 9(8). 231-239 (In English).
9. Rego G., Ferrero F., Valledor M., Campo J.C., Forcada S., Royo L.J., Soldado A. A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. 175. 105578 (In English).
10. Buza M.H., Holden L.A., White R.A., Ishler V.A. Evaluating the effect of ration composition on income over feed cost and milk yield. *Journal of dairy science*. 2014. 97(5). 3073-3080 (In English).
11. Bargo F., Muller L.D., Delahoy J.E., Cassidy T.W. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of dairy science*. 2002. 85(7). 1777-1792 (In English).
12. Bloch V., Levit H., Halachmi I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows. *Journal of dairy research*. 2019. 86(1). 34-39 (In English).
13. Krawczel P.D., Klaiber L.M., Thibeau S.S., Dann H.M. Technical note: Data loggers are a valid method for assessing the feeding behavior of dairy cows using the Calan Broad-



- bent Feeding System. *Journal of dairy science*. 2012. 95(8). 4452-4456 (In English).
14. Samokhvalov A.A., Veyko V.P., Lednev V.N., Pershin S.M., Fedorov A.N., Parfenov V.A., Kirtsideli I.Yu., Shchegolikhin A.N. Lazernaya ekspress-diagnostika mikromitsetov-biodestruktorov [Laser express-diagnostics of micro-mycetes-biodestructors]. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2017. N9. 71-77 (In Russian).
 15. Pershin S.M., Brysev A.P., Grishin M.Ya., Lednev V.N., Bunkin A.F., Klopotov R.V. Rekonstruktsiya nelineynogo profilya davleniya ul'trazvukovogo puchka v vode po signalam lidara kombinatsionnogo rasseyaniya [Reconstructing the nonlinear pressure profile of an ultrasonic beam in water using raman lidar signals]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2021. Vol. 85. N6. 863-868 (In Russian).
 16. Yanykin D.V., Burmistrov D.E., Simakin A.V., Ermakova J.A., Gudkov S.V. Effect of up-converting luminescent nanoparticles with increased quantum yield incorporated into the fluoropolymer matrix on solanum lycopersicum growth. *Agronomy*. 2022. 12(1). 108 (In English).
 17. Sharapov M.G., Gudkov S.V., Lankin V.Z. Hydroperoxide-reducing enzymes in the regulation of free-radical processes. *Biochemistry (Moscow)*. 2021. 86(10). 1256-1274 (In English).
 18. Grinberg M.A., Balalaeva I.V., Gromova E., Sinitsyna Y., Sukhov V., Vodeneev V., Gudkov S.V. Effect of chronic β -Radiation on long-distance electrical signals in wheat and their role in adaptation to heat stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2021. 184. 104378 (In English).
 19. Bashilov A.M., Efremkov I.Y., Belyakov M.V., Lavarov A.V., Gulyaev A.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Boyko A.A. Determination of Main Spectral and Luminescent Characteristics of Winter Wheat Seeds Infected with Pathogenic Microflora. *Photonics*. 2021. 8. 494 (In English).
 20. Simakin A.V., Ivanyuk V.V., Gudkov S.V., Dorokhov A.S. Photoconversion fluoropolymer films for the cultivation of agricultural plants under conditions of insufficient insolation. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. 10. N22. 1-10 (In English).
 21. Ivanyuk V.V., Shkirin A.V., Belosludtsev K.N., et al. Influence of fluoropolymer film modified with nanoscale photoluminophor on growth and development of plants. *Frontiers in Physics*. 2020. 8. 1-6 (In English).
 22. Semenova N.A., Smirnov A.A., Grishin A.A., et al. The effect of plant growth compensation by adding silicon-containing fertilizer under light stress conditions. *Plants*. 2021. 10. N7. 1287 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Беляков М.В. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, обработка результатов исследований, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ;

Никитин Е.А. – обзор литературы, получение исследуемых образцов, формулирование основных направлений исследования, визуализация;

Ефременков И.Ю. – проведение измерений и расчетов, обработка результатов исследований, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Belyakov M.V. – scientific guidance, formulating the main research directions, development of the theoretical premises, research results processing, manuscript revision,, formulating general conclusions and literature review;

Nikitin E.A. – literature review, obtaining test samples, formulating the main directions of the research, visualization;

Efremkov I.Yu. – measurements and calculations, research results processing, visualization.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

07.02.2022

26.04.2022