

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.372:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

Определение содержания сырого протеина в жмыхах по потокам фотолюминесценции

М.В. Беляков^{1✉}, *Е.А. Никитин*², *Д.С. Пятченков*³^{1,2,3} Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>² evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>³ denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

Аннотация. Определение белка в кормах методом фотолюминесцентной спектроскопии позволит существенно ускорить процесс приготовления кормов. Исследования проведены с целью анализа зависимостей параметров фотолюминесценции подсолнечного и соевого жмыхов от содержания в них сырого протеина для определения информативных параметров и спектральных диапазонов. Эксперимент проводили на дифракционном спектрофлуориметре SM 2203. Определяли спектральные характеристики возбуждения и спектральные характеристики фотолюминесценции измельченных до 1,8 мм частиц подсолнечного и соевого жмыхов с различным содержанием сырого протеина. Рассчитали интегральные параметры спектров – поглощательную способность и поток фотолюминесценции. Спектральные характеристики возбуждения исследуемых кормов расположены в области 300...500 нм и являются суперпозицией максимумов на длинах волн 290, 362, 414/424 нм и более слабого на 485 нм. Выявили, что с увеличением содержания протеина спектральная поглощательная способность жмыха возрастает. Зависимости интегральных потоков фотолюминесценции от содержания протеина статистически достоверны (коэффициенты детерминации – 0,84...0,99) и могут быть аппроксимированы линейными уравнениями регрессии. Для фотолюминесцентного определения содержания сырого протеина в подсолнечном жмыхе наиболее подходящими длинами волн возбуждающего излучения являются 362 и 414 нм, в соевом жмыхе – 362 и 424 нм. При создании единой методики целесообразно использовать длину волны возбуждения 362 нм и регистрировать поток фотолюминесценции в диапазоне 410...600 нм. Полученные спектральные параметры и уравнения регрессии могут быть использованы для создания экспрессных приборов контроля кормов и совершенствования технологических процессов при приготовлении кормовых смесей.

Ключевые слова: подсолнечный жмых; соевый жмых; протеин; содержание сырого протеина; спектр излучения; поток фотолюминесценции; спектральная поглощательная способность жмыха; спектральные характеристики возбуждения; спектральные характеристики фотолюминесценции

Финансирование. Работа выполнена в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в рамках госзадания FGUN-2025-0013.

Для цитирования: Беляков М.В., Никитин Е.А., Пятченков Д.С. Определение содержания сырого протеина в жмыхах по потокам фотолюминесценции. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):28-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

ORIGINAL ARTICLE

Determination of crude protein content in oilcakes by photoluminescence fluxes

M.V. Belyakov^{1✉}, *E.A. Nikitin*², *D.S. Pyatchenkov*³^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>² evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>³ denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

Abstract. Determination of crude protein in animal feed using photoluminescence spectroscopy can significantly accelerate the feed preparation process. This study aimed to analyze the dependencies of photoluminescence parameters in sunflower and soybean oilcakes on their crude protein content to identify informative parameters and optimal spectral ranges. The experiment was conducted using a SM 2203 diffraction spectrofluorometer.

The research involved determining the excitation and photoluminescence spectral characteristics of sunflower and soybean oilcake particles ground to 1.8 mm with varying crude protein levels. Integrated spectral parameters, specifically absorptivity and photoluminescence flux, were calculated. The excitation characteristics of the studied feeds are located in the 300-500 nm range and represent a superposition of peaks at 290, 362, and 414/424 nm, with a weaker peak at 485 nm. It was found that spectral absorptivity increases with higher protein content. The dependencies of integrated photoluminescence fluxes on protein content are statistically significant (coefficients of determination = 0.84–0.99) and can be approximated by linear regression equations. For the photoluminescence-based determination of crude protein, the most suitable excitation wavelengths are 362 and 414 nm for sunflower oilcake, and 362 and 424 nm for soybean oilcake. For a unified methodology, it is advisable to use an excitation wavelength of 362 nm while recording the photoluminescence flux in the 410–600 nm range. The resulting spectral parameters and regression equations can be utilized to develop rapid-testing instruments and optimize technological processes in the preparation of feed mixtures.

Keywords: sunflower cake; soy cake; crude protein; excitation spectrum; radiation spectrum; photoluminescence flux; statistical parameters

Funding. The research was carried out at Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FSAC VIM) within the framework of the State assignment No. FGUN-2025-0013.

For citation: Belyakov M.V., Nikitin E.A., Pyatchenkov D.S. Determination of crude protein content in oilcakes by photoluminescence fluxes. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):28-35 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-28-35>

Введение

Стратегия кормления животных определяет значимые аспекты эффективности агропредприятия: продуктивное долголетие животных, содержание питательных веществ в молоке [1, 2], капиталоотдача от затрат на кормление. Правильно сбалансированный рацион кормления животных способствует оптимальному метаболизму, снижению риска заболеваний, содействуя устойчивому развитию животноводства и уменьшению экологической нагрузки [3].

В кормлении животных особую роль играет концентрация протеина, служащего строительным материалом для синтеза мышечной ткани животного и выработки молока [4]. Дефицит протеина приводит к расстройству физиологических процессов и снижению продуктивности. В то же время его избыток не успевает усваиваться организмом, что приводит к выведению азота в виде мочевины, перерасходу кормов и росту себестоимости продукции [5]. При составлении суточного рациона кормления крупного рогатого скота решается множество задач оптимизации по различным критериям, главными из которых являются уровень потребления сухого вещества и концентрация протеина. Помимо набора живой массы, уровень суточного потребления протеина может влиять на репродуктивные качества коров и здоровье телят [6], определять суточные надои и концентрацию белка в молоке [7, 8].

Наиболее дешевым источником белка в рационе крупного рогатого скота являются побочные продукты переработки масличных культур [9]. Наиболее распространены соевый и подсолнечный

жмыхи. Соя, как высокобелковая культура, решает проблему обеспечения протеина во многих регионах страны [10]. Соевый жмых по биологической ценности и содержанию незаменимых аминокислот занимает лидирующие позиции среди растительных кормов [11]. Его использование положительно сказывается на продуктивности молочных коров [12], показателях роста бройлеров [13] и эффективности откорма поросят [14]. Подсолнечный жмых, содержащий 30...40% протеина и обладающий высокой энергетической ценностью, также является эффективной концентрированной добавкой к кормовой смеси КРС [15]. Его белок легко расщепляется в рубце, улучшает использование азота и способствует повышению продуктивности и мясных качеств жвачных животных [16].

Для определения белка в кормах применяют арбитражные и современные методы. К арбитражным методам относят метод Кьельдаля (обработка образца кислотой с последующим титрованием высвободившегося азота и расчетом белка через поправочный коэффициент) и метод Дюма (определение количества азота при сжигании образца). Среди колориметрических методов [17] широко используется метод Брэдфорда [18], основанный на сдвиге максимума поглощения красителя бриллиантовый синий G-250 с 465 до 595 нм при связывании с белком, и метод Лоури, базирующийся на измерении поглощения калибровочных растворов на спектрофотометре [19, 20]. Среди наиболее совершенных оптико-спектральных методов выделяют спектроскопию отражения в ближней инфракрасной области [21], рамановскую

гиперспектральную визуализацию [22] и др. Несмотря на точность количественного определения протеинов, все перечисленные методы характеризуются достаточной продолжительностью анализа, для их проведения необходимы наличие дорогого оборудования и химических реагентов, разрушение образца. В связи с этим перспективным представляется фотолюминесцентный способ определения белка в кормах, на основе которого возможно создание устройств, лишенных указанных ограничений.

Цель исследований: изучение зависимостей параметров фотолюминесценции подсолнечного и соевого жмыхов от содержания сырого протеина для определения информативных параметров и спектральных диапазонов.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводили в течение 2024-2025 гг. на базе лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Исследуемые образцы жмыхов получены в 2023 г. из ООО «Агрочерноземье» (Курская область).

Образцы жмыхов измельчали в лабораторной мельнице до размеров не более 1,8 мм для соответствия требованиям к кормам для крупного рогатого скота включая молодняк.

Содержание протеина в измельченных жмыхах варьировали путем добавления измельченного соевого белка с последующим тщательным перемешиванием. Содержание сырого протеина измеряли

на анализаторе кормов FOSS NIRS DS2500 с погрешностью до 2%.

Спектры возбуждения $\eta(\lambda)$ при синхронном сканировании и люминесценции $\varphi(\lambda)$ измеряли на дифракционном спектрофлуориметре CM 2203. Повторность измерений – двадцатикратная.

Интегральные параметры спектров возбуждения (интегральную поглощательную способность H) и спектров люминесценции (поток фотолюминесценции Φ) рассчитывали по формулам:

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

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

где $\eta(\lambda)$ – спектр возбуждения; $\varphi(\lambda)$ – спектр люминесценции; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – границы спектров.

Методика спектральных измерений и обработки результатов подробно описана в работе [23].

Результаты и их обсуждение

Спектры возбуждения $\eta(\lambda)$ при синхронном сканировании подсолнечного жмыха с различным содержанием сырого протеина C_p представлены на рисунке 1.

Спектральные характеристики возбуждения измельченного подсолнечного жмыха расположены в области около 300...500 нм и являются суперпозицией максимумов на 362 нм, 424 нм и более слабого

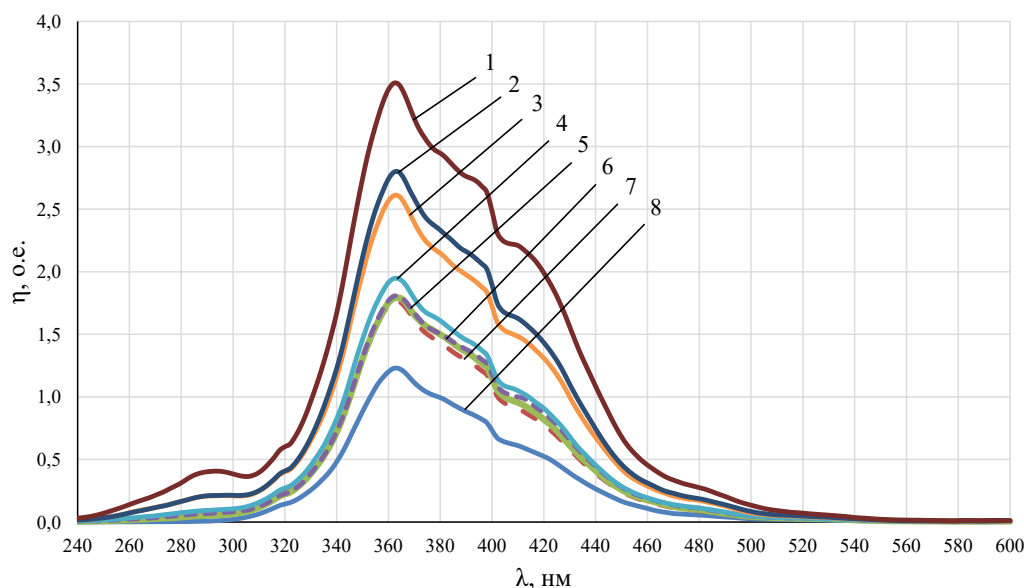


Рис. 1. Синхронные спектры возбуждения подсолнечного жмыха с различным содержанием сырого протеина C_p , %:

1 – 45,60; 2 – 39,55; 3 – 38,44; 4 – 33,56; 5 – 32,05; 6 – 31,07; 7 – 29,72; 8 – 25,14

Fig. 1. Synchronous excitation spectra of sunflower cakes with different crude protein content C_p , %:

1 – 45.60; 2 – 39.55; 3 – 38.44; 4 – 33.56; 5 – 32.05; 6 – 31.07; 7 – 29.72; 8 – 25.14

на 485 нм, характерных для большинства растительных биообъектов [24, 25]. С увеличением содержания протеина спектральная поглощательная способность жмыха η заметно возрастает: при росте C_p в 1,8 раза максимум спектра увеличивается примерно в 2,9 раза. Это можно объяснить более интенсивным свечением аминокислот.

Спектры возбуждения соевого жмыха аналогично спектрам подсолнечного находятся в диапазоне 250...500 нм с главными максимумами примерно на 290, 362 и 414 нм, а также менее выраженными максимумами на длинах волн 318 нм и 485 нм. Отличием являются разное соотношение интенсивностей максимумов 362 нм и 424 нм и большая интенсивность максимумов для соевого жмыха по причине более светлого цвета. Если более длинноволновые максимумы 362 нм и 414 нм были отмечены ранее для целых зерен [23], то коротковолновый максимум 290 нм отмечен только для измельченных продуктов.

По формулам (1) и (2) рассчитаны интегральные поглощательные способности H во всем измеряемом диапазоне (230...600 нм) и на отдельных его участках, соответствующих основным максимумам (табл. 1, 2).

Для подсолнечного жмыха измерены спектральные характеристики фотолюминесценции при длине волны возбуждения (λ_b) 362 и 414 нм, для соевого жмыха – при 282, 362 и 424 нм. По формуле (2) рассчитали потоки фотолюминесценции Φ в трех диапазонах: 320...500 нм для $\lambda_b = 280$ нм; 410...600 нм для $\lambda_b = 362$ нм; 470...650 нм для $\lambda_b = 414$ и 424 нм (табл. 1, 2).

Зависимости потоков фотолюминесценции Φ_λ от содержания протеина C_p и их линейная аппроксимация представлены на рисунках 3, 4.

На основании зависимостей $C_p(\Phi_\lambda)$ подсолнечного жмыха и их аппроксимации получены обратные уравнения регрессии $C_p(\Phi)$ при длине волны возбуждения 414 нм и 362 нм с коэффициентами детерминации, соответственно, $R^2 = 0,96$ и $R^2 = 0,98$:

$$C_p = 0,057\Phi_{424} + 19,382; \quad (3)$$

$$C_p = 0,040\Phi_{362} + 12,831. \quad (4)$$

Обе линейные зависимости $C_p(\Phi_\lambda)$ подсолнечного жмыха статистически достоверны, но для $\lambda_b = 362$ нм немного ниже относительная погрешность определения потока и в два раза больше пропорциональный потоку максимальный фотосигнал.

Уравнения регрессии $C_p(\Phi)$ для соевого жмыха при длине волны возбуждения 424, 362 и 282 нм с коэффициентами детерминации, соответственно, $R^2 = 0,97$, $R^2 = 0,97$ и $R^2 = 0,84$ выглядят следующим образом:

$$C_p = 0,047\Phi_{424} - 56,856; \quad (5)$$

$$C_p = 0,040\Phi_{362} - 4,970; \quad (6)$$

$$C_p = 0,206\Phi_{282} - 8,146. \quad (7)$$

Для соевого жмыха использование $\lambda_b = 282$ нм является нецелесообразным ввиду сравнительно низкого потока (табл. 2) и небольшого коэффициента детерминации ($R^2 = 0,84$). Зависимости $C_p(\Phi_\lambda)$ для $\lambda_b = 362$ нм и $\lambda_b = 424$ нм имеют небольшую

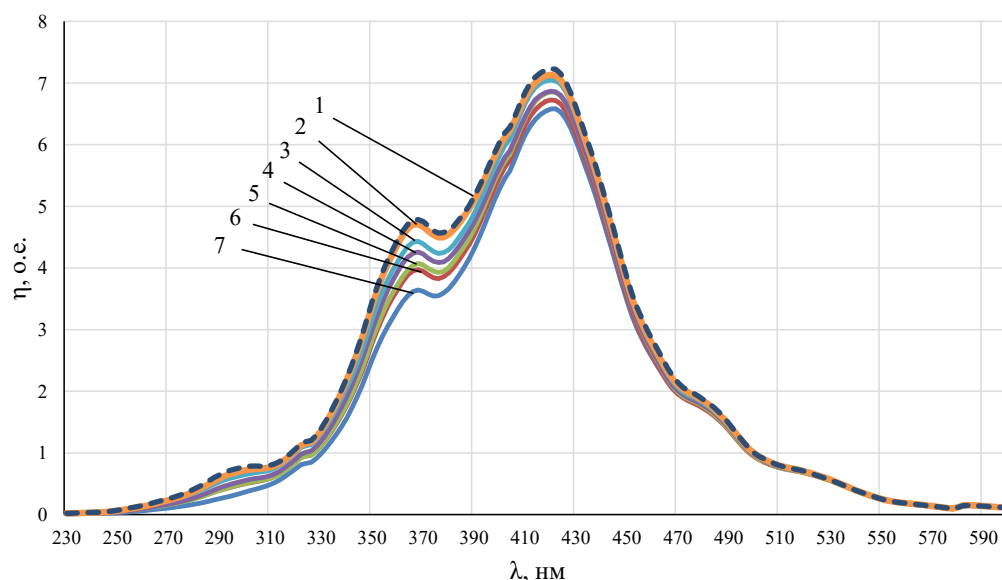


Рис. 2. Синхронные спектры возбуждения соевого жмыха с различным содержанием сырого протеина C_p , %: 1 – 51,63; 2 – 50,82; 3 – 48,16; 4 – 47,37; 5 – 46,30; 6 – 45,20; 7 – 43,10

Fig. 2. Synchronous excitation spectra of soy cakes with different crude protein content C_p , %: 1 – 51.63; 2 – 50.82; 3 – 48.16; 4 – 47.37; 5 – 46.30; 6 – 45.20; 7 – 43.10

Таблица 1

Интегральные параметры спектров возбуждения и люминесценции подсолнечного жмыха с различным содержанием протеина C_p

Table 1

Integral parameters of the excitation and luminescence spectra of sunflower cakes with different C_p protein content

Содержание сырого протеина, C_p , %	Н±ΔН, о.е., для диапазона, нм			Φ±ΔΦ, о.е., для λ_{ex} , нм	
	230...600	325...405	405...450	362	414
25,14±0,43	91±8	66±6	18±1,4	327±28	133±10
29,72±0,51	136±9	97±6	27±1,8	447±24	194±13
31,07±0,53	140±10	100±7	29±2,3	458±28	205±16
32,05±0,48	145±9	101±6	31±2,1	465±25	217±14
33,56±0,50	156±10	109±7	32±3,0	487±29	224±21
38,44±0,65	220±14	146±9	49±4,3	611±38	309±26
39,55±0,63	237±11	157±7	54±3,2	650±32	332±24
45,60±0,82	320±16	203±9	75±5,2	842±36	488±34

Таблица 2

Интегральные параметры спектров возбуждения и люминесценции соевого жмыха с различным содержанием протеина C_p

Table 2

Integral parameters of the excitation and luminescence spectra of soy cakes with different C_p protein content

Содержание сырого протеина, C_p , %	Н±ΔН, о.е., для диапазона, нм				Φ±ΔΦ, о.е., для λ_{ex} , нм		
	230...600	270...310	320...370	370...450	282	362	424
43,10±0,75	692±16	13±2	123±6	418±10	252±9	1196±30	2156±40
45,20±0,77	725±26	18±3	137±9	433±13	257±12	1239±47	2174±46
46,30±0,65	737±25	18±3	139±8	441±12	263±12	1263±46	2208±51
47,37±0,81	754±14	20±2	147±5	466±7	268±6	1286±23	2229±38
48,16±0,95	784±11	23±4	155±9	459±5	284±11	1343±24	2269±45
50,82±0,76	809±19	26±3	166±8	470±8	284±12	1374±42	2296±24
51,63±0,87	824±31	28±4	169±10	477±15	282±15	1395±53	2328±55

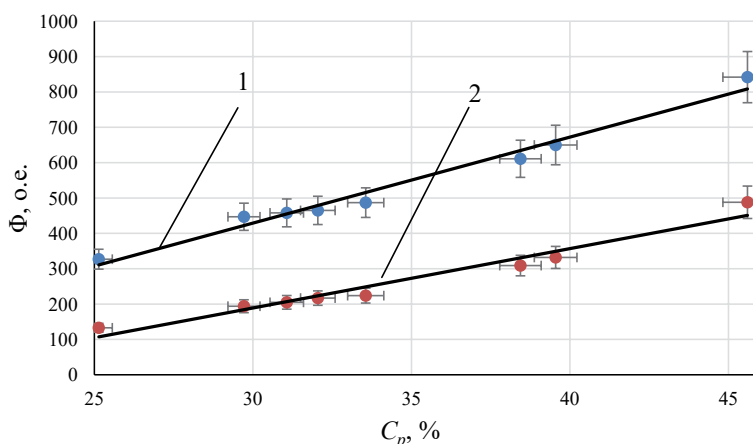


Рис. 3. Зависимость потока фотолюминесценции (Φ) от концентрации протеина (C_p) в подсолнечном жмыхе при характерной длине волны возбуждения: 1 – 362 нм; 2 – 414 нм

Fig. 3. Relationship between the photoluminescence flux (Φ) and the protein concentration (C_p) in sunflower cakes at an excitation wavelength: 1 – 362 nm, 2 – 414 nm

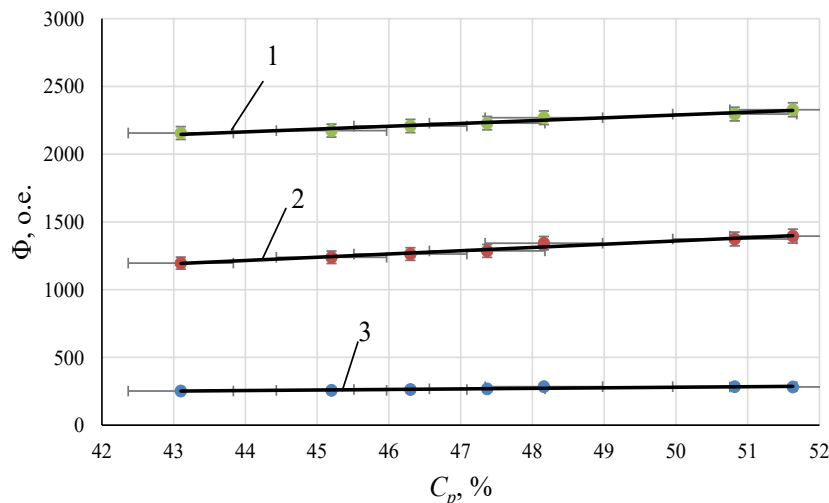


Рис. 4. Зависимость потока фотолюминесценции (Φ) от концентрации протеина (C_p) в соевом жмыхе при характерной длине волны возбуждения:

1 – 424 нм; 2 – 362 нм; 3 – 282 нм

Fig. 4. Relationship between the photoluminescence flux (Φ) and the protein concentration (C_p) in soy cakes at an excitation wavelength of:

1 – 424 nm; 2 – 362 nm; 3 – 282 nm

погрешность определения потока – 3,8 и 2,4% соответственно, а также высокий уровень фотосигнала.

Сравнивая уравнения (3)-(4) и (5)-(7), следует отметить разные знаки при свободных членах уравнений регрессии, что объясняется разным уровнем потоков фотолюминесценции: для более светлого соевого жмыха фотосигнал кратно выше.

Несмотря на несколько большую погрешность предлагаемого метода (3,8...8,6% по сравнению с 2% у FOSS NIRS), использование фотолюминесцентных датчиков позволит значительно сократить время анализа до 1-2 с (FOSS NIRS и подобные анализаторы прогреваются 40 мин и выдают результат в течение 10 с), а также создать более дешевый прибор, работающий в полевых условиях.

Экспрессный прибор контроля кормов стоимостью не более 100...150 тыс. руб. будет дешевле инфракрасных аналогов FOSS NIRS ценой от 10 млн руб., X-NIR (от 1,75 млн руб.), SCiO Cup (от 300 тыс. руб.), Инфраскан-4200 (от 2,75 млн руб.), ИнфраЛЮМ ФТ-1 2 (от 1,8 млн руб.).

Дальнейшими этапами исследований являются расширение номенклатуры анализируемых кормов

и снижение погрешности измерений путем применения интегральных датчиков фотосигнала (фотодиодов), реализующих многократные измерения (до 250 измерений в секунду).

Выводы

1. При увеличении содержания протеина в жмыхах заметно усиливаются их фотолюминесцентные свойства, что объясняется свечением аминокислот.

2. Наиболее подходящими длинами волн возбуждающего излучения для подсолнечного жмыха являются 362 и 414 нм, для соевого – 362 и 424 нм. При создании единой методики фотолюминесцентного определения протеина целесообразно использовать длину волны возбуждения 362 нм и регистрировать поток фотолюминесценции в диапазоне 410...600 нм.

3. Полученные спектральные параметры и уравнения регрессии (3)-(6) могут быть использованы для создания приборов экспресс-контроля кормов в технологических линиях, а также в прицепных смесителях для последующей оценки потребления сырого протеина конкретной технологической группы животных на ферме.

Список источников

1. Martins L.F., Wasson D.E., Hristov A.N. Feeding dairy cows for improved metabolism and health. *Animal Frontiers*. 2022;12(5):29-36. <https://doi.org/10.1093/af/vfac059>
2. Moorby J.M., Fraser M.D. Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*. 2021;15:100297. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100297>

References

1. Martins L.F., Wasson D.E., Hristov A.N. Feeding dairy cows for improved metabolism and health. *Animal Frontiers*. 2022;12(5):29-36. <https://doi.org/10.1093/af/vfac059>
2. Moorby J.M., Fraser M.D. Review: New feeds and new feeding systems in intensive and semi-intensive forage-fed ruminant livestock systems. *Animal*. 2021;15:100297. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100297>

3. Untea A.E., Saracila M., Vlaicu P.A. Feeding strategies and nutritional quality of animal products. *Agriculture*. 2023;13(9):1788. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091788>
4. Рыжкова Г.Ф., Ярован Н.И., Милукова М.В. Влияние соевой муки в рационах коров в период лактации на химический состав молока и молочную продуктивность // Ветеринария и кормление. 2022. № 1. С. 48-51. <https://doi.org/10.30917/АТТ-ВК-1814-9588-2022-1-11>
5. Мартынов В.А., Ломова Т.Г. Роль энергопротеиновой добавки в кормлении лактирующих коров // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4 (65). С. 147-152. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-65-4-147-152>
6. Meneses J.A.M., Nascimento K.B., Galvão M.C. et al. Protein supplementation during mid-gestation affects maternal voluntary feed intake, performance, digestibility, and uterine blood flow of beef cows. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2024;108(6):1678-1691. <https://doi.org/10.1111/jpn.14001>
7. Doran M.J., Mulligan F.J., Lynch M.B. et al. Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*. 2023;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
8. Ghaffari M.H., Drackley J.K., Kertz A.F. Invited review: Unlocking growth and development potential in dairy calves through precision protein feeding. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(7):6601-6616. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26419>
9. Oancea A.G., Dragomir C., Cismileanu A. The effects of minor oilseeds cakes on rumen metabolism and productive performances of ruminants. *Archiva Zootechnica*. 2022;25(2):130-157. EDN: VWLVDZ
10. Туктафулин Г.С., Гогаев О.К., Годжиев Р.С., Накастхоева Х.А. Перспективы использования сои в кормлении лактирующих коров // Известия Горского государственного аграрного университета. 2020. Т. 57, № 2. С. 56-60. EDN: RNFMRX
11. 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. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.60.4.011>
12. Туктафулин Г.С., Гогаев О.К., Годжиев Р.С. Использование сои в рационах высокопродуктивных коров // Известия Горского государственного аграрного университета. 2019. Т. 56, № 2. С. 62-66. EDN: SRBHUX
13. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D. et al. Efficiency of soybean products in broiler chicken nutrition. *Animals*. 2022;12(3):294. PMID: PMC8833819
14. Johannsen J.C., Nørgaard J.V., Theil P.K. et al. Effects of a high protein starter diet with fermented soybean cake on growth performance of organic pigs weaned outdoor. *Livestock Science*. 2023;267:105141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105141>
15. Усеня Ю.С., Садовская А.В., Филатова Л.В. и др. Перспективы использования вторичных продуктов переработки масличных культур для обогащения пищевых концентратов // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2020. Т. 13, № 1 (47). С. 28-35. EDN: MNEHDE
16. Da Silva Oliveira V., Barbosa A.M., De Andrade E.A. et al. Sunflower cake from the biodiesel industry in the diet improves the performance and carcass traits of nellore young bulls. *Animals*. 2022;12(23):3243. PMID: PMC9741455
17. Hayes M. Measuring protein content in food: an overview of methods. *Foods*. 2020;9(10):1340. PMID: PMC7597951
18. Karimi F., Hamidian Y., Behrouzifar F. et al. An applicable method for extraction of whole seeds protein and its determination through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>
19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung
3. Untea A.E., Saracila M., Vlaicu P.A. Feeding strategies and nutritional quality of animal products. *Agriculture*. 2023;13(9):1788. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091788>
4. Ryzhkova G.F., Yarovan N.I., Milyukova M.V. The effect of soy flour on the chemical composition of milk and milk producing ability in the diets of cows during their lactation. *Veterinaria i kormlenie*. 2022;1:48-51. (In Russ.)
5. Martynov V.A., Lomova T.G. The role of energy-protein supplementation in feeding lactation cow. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022;(4):147-152. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-65-4-147-152>
6. Meneses J.A.M., Nascimento K.B., Galvão M.C. et al. Protein supplementation during mid-gestation affects maternal voluntary feed intake, performance, digestibility, and uterine blood flow of beef cows. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2024;108(6):1678-1691. <https://doi.org/10.1111/jpn.14001>
7. Doran M.J., Mulligan F.J., Lynch M.B. et al. Effects of protein supplementation strategy and genotype on milk production and nitrogen utilisation efficiency in late-lactation, spring-calving grazing dairy cows. *Animals*. 2023;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/ani13040570>
8. Ghaffari M.H., Drackley J.K., Kertz A.F. Invited review: Unlocking growth and development potential in dairy calves through precision protein feeding. *Journal of Dairy Science*. 2025;108(7):6601-6616. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26419>
9. Oancea A.G., Dragomir C., Cismileanu A. The effects of minor oilseeds cakes on rumen metabolism and productive performances of ruminants. *Archiva Zootechnica*. 2022;25(2):130-157.
10. Thuktafulin G.S., Gogaev O.K., Godzhiev R.S., Nakasthioeva Kh.A. Prospects for soybean use in lactating cows feeding. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2020;57(2):56-60. (In Russ.)
11. Kandrov R.H., Porechnaya E.S., Smirnova A.R. Processing of soybean meal and cake into flour and bran. *Vestnik APK Verkhnevolzhya=Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2022;4(60):92-99. (In Russ.)
12. Tuktfulin G.S., Gogaev O.K., Gogijev R.S. Use of soybeans in diets of highly productive cows. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2019;56(2):62-66.
13. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D. et al. Efficiency of soybean products in broiler chicken nutrition. *Animals*. 2022;12(3):294. PMID: PMC8833819
14. Johannsen J.C., Nørgaard J.V., Theil P.K. et al. Effects of a high protein starter diet with fermented soybean cake on growth performance of organic pigs weaned outdoor. *Livestock Science*. 2023;267:105141. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105141>
15. Usenya Ju.S., Sadovskaya A.V., Filatova L.V., Roslik V.L., Garinskaya M.I. Prospects for the use of secondary products of processing of oil crops for the enrichment of food concentrate. *Food industry: Science and Technologies*. 2020;13(1):28-35. (In Russ.)
16. Da Silva Oliveira V., Barbosa A.M., De Andrade E.A. et al. Sunflower cake from the biodiesel industry in the diet improves the performance and carcass traits of nellore young bulls. *Animals*. 2022;12(23):3243. PMID: PMC9741455
17. Hayes M. Measuring protein content in food: an overview of methods. *Foods*. 2020;9(10):1340. PMID: PMC7597951
18. Karimi F., Hamidian Y., Behrouzifar F. et al. An applicable method for extraction of whole seeds protein and its determination through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>
19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung

through Bradford's method. *Food and Chemical Toxicology*. 2022;164:113053. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113053>

19. Rizvi N.B., Aleem S., Khan M.R., Ashraf S., Busquets R. Quantitative estimation of protein in sprouts of *Vigna radiate* (Mung Beans), *Lens culinaris* (Lentils), and *Cicer arietinum* (Chickpeas) by Kjeldahl and Lowry methods. *Molecules*. 2022;27(3):814. PMID: PMC8839272

20. McClements D.J., Kinchla A.J., Nolden A.A. et al. Methods for testing the quality attributes of plant-based foods: Meat-and processed-meat analogs. *Foods*. 2021;10(2):260. PMID: PMC7911933

21. Попов В.С., Шеленга Т.В., Блинова Е.В., Хорева В.И. Применение БИК-спектроскопии для определения основных биохимических показателей качества зерна у овса песчаного // Биотехнология и селекция растений. 2024. Т. 7, № 2. С. 31-41. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2024-2-01>

22. Aulia R., Amanah H.Z., Lee H. et al. Protein and lipid content estimation in soybeans using Raman hyperspectral imaging. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1167139>

23. Беляков М.В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений // Агрофизика. 2024. № 4. С. 72-78. <https://doi.org/10.25695/AGRP.2024.04.09>

24. 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;6:3137-3158. EDN: JEGUAV

25. Donaldson L. Autofluorescence in plants. *Molecules*. 2020;25:2393. EDN: GGFVPV PMID: PMC7288016

Информация об авторах

¹ **Беляков Михаил Владимирович**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; bmw20100@mail.ru; SPIN-код: 2864-9937; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² **Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; evgeniy.nicks@yandex.ru; SPIN-код: 7453-6947; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

³ **Пятченков Денис Сергеевич**, младший научный сотрудник; denis.piat@yandex.ru; SPIN-код: 7135-4229 <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

^{1,2,3} Федеральное научное агроинженерное учреждение ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

Беляков М.В. – концептуализация, методология, руководство исследованиями, верификация данных;

Никитин Е.А. – ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Пятченков Д.С. – проведение исследований, формальный анализ, визуализация, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 02.12.2025, после рецензирования и доработки 18.02.2026, принята к публикации 26.03.2026

Author Information

Mikhail V. Belyakov¹, DSc (Eng), Chief Research Engineer; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>; ResearcherID: W-2746-2018; Scopus Author ID: 6701456418

Evgeniy A. Nikitin², CSc (Eng), Senior Research Engineer; evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>; ResearcherID: AZZ-6665-2020; Scopus Author ID: 57216910742;

Denis S. Pyatchenkov³, Junior Research Engineer; denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>; ResearcherID: JYP-8066-2024; Scopus Author ID: 57735507400

^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Author Contribution

Belyakov M.V. – conceptualization, methodology, research supervision, data verification;

Nikitin E.A. – resources, writing – review and editing of the manuscript;

Pyatchenkov D.S. – investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 02.12.2025; Revised 18.02.2026; Accepted 26.03.2026