

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 535.34:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>

Экспресс-диагностика комбикорма и его составляющих методом видимой и ближней инфракрасной спектроскопии

М.В. Беляков¹, Е.А. Никитин², Д.С. Пятченков³^{1,2,3} Федеральный 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. Экспресс-диагностика комбикорма на соответствие фактическому и заявленному составу весьма актуальна на рынке производства концентрированных комбикормов. Исследования проведены с целью анализа эффективности диагностики концентрированного комбикорма методом спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения и определения информативных спектральных диапазонов экспресс-диагностики комбикорма. Измерение спектров отражения и поглощения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне проводили на приборе Foss NIRS2500. Измеряли спектральные характеристики поглощения в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм 4-компонентного комбикорма и его составляющих: барды кукурузной, шрота рапсового, жома свекловичного, кукурузы молотой. Установлено, что рассчитанные интегральные коэффициенты поглощения комбикорма и его компонентов в диапазоне 0,4...2,5 мкм различаются и статистически достоверны. Выявлено влияние фракционного состава компонентов на точность измерения оптических параметров. Несоответствие комбикормов рецептуре можно выявить при сравнении спектральных характеристик комбикормов и клетчатки. Сравнение спектров поглощения клетчатки, 4-компонентного комбикорма и 2-компонентного комбикорма из кукурузы и ячменя показало, что наибольшее отличие поглощательных свойств отдельных составляющих комбикорма наблюдается либо в коротковолновом диапазоне 0,4...1,2 мкм, либо в диапазоне свыше 1,65 мкм. При этом характеристики $\alpha(\lambda)$ в коротковолновом диапазоне менее системны, что требует выделения более узких спектральных интервалов, например: 0,40...0,54 или 1,13...1,22 мкм. Отличие спектральных поглощающих свойств комбикормов наиболее проявляется в коротковолновой области ($\lambda < 1,36$ мкм). Для клетчатки наибольшее различие в области – менее 800 нм. Представленные результаты послужат теоретической основой для разработки и производства оптической приборной базы для диагностики качества (соответствие заявленной рецептуре и компонентному составу) концентрированных комбикормов для животноводства.

Ключевые слова: комбикорм, экспресс-диагностика комбикорма, спектроскопия, спектральные характеристики поглощения, интегральный коэффициент поглощения, математическое ожидание

Для цитирования: Беляков М.В., Никитин Е.А., Пятченков Д.С. Экспресс-диагностика комбикорма и его составляющих методом видимой и ближней инфракрасной спектроскопии // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 1. С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>

ORIGINAL ARTICLE

Diagnostics of compound feeds and their components by visible and near infrared spectroscopy

M.V. Belyakov¹, E.A. Nikitin², D.S. Pyatchenkov³^{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. Fast diagnostics of the compliance of the actual composition of concentrated compound feeds to the prescribed one is one of the topical issues of the modern market of compound feed production. The article examines the efficiency of diagnosing the compound feed by spectroscopy of visible and near infrared radiation and identifies informative spectral ranges of the fast diagnosing of compound feeds. The reflection and absorption spectra in the near infrared range were measured using the Foss NIRS2500 instrument (Foss, Denmark). We measured spectral absorption characteristics in the range between 0.4 and 2.5 μm of four-component mixed fodder and its components – corn stillage, rapeseed meal,

beet pulp, and ground corn. It has been found that the calculated integral absorption coefficients of mixed fodder and its components in the range between 0.4 and 2.5 μm , differ and are statistically reliable. The studies have revealed influence of fractional composition of components on the accuracy of measurement of optical parameters. The incompliance of compound feeds with the prescribed formulation can be revealed by comparing the spectral characteristics of compound feeds and fiber. Comparison of absorption spectra of fiber, four-component mixed fodder and two-component mixed fodder from corn and barley revealed that the greatest difference in the absorption properties of individual components of compound feed is observed either in the short-wave range of 0.4 to 1.2 microns, or in the range above 1.65 microns. At the same time, the characteristics of $\alpha(\lambda)$ in the shortwave range are less systemic, which requires the allocation of narrower spectral intervals, for example, 0.40 to 0.54 or 1.13 to 1.22 microns. The difference in the spectral absorbing properties of various compound feeds is most evident in the short-wavelength region ($\lambda < 1.36$ microns). For fiber, the greatest difference is in the area of less than 800 nm. The presented results may serve as a theoretical basis for the development and production of an optical instrument base for quality diagnostics for compliance with the prescribed formulation and component composition of concentrated compound feeds used in animal husbandry.

Keywords: compound feeds, rapid evaluation of compound feeds, spectroscopy, absorption spectrum, integral absorption coefficient, mathematical expectation

For citation: Belyakov M.V., Nikitin E.A., Pyatchenkov D.S. Diagnostics of compound feeds and their components by visible and near infrared spectroscopy. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(1):68-74 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-68-74>

Введение

Выполнение сложных циклических операций и повышение качества получаемой продукции животноводства обуславливают развитие и внедрение в сельское хозяйство современных технологий [1].

Применение оборудования для приготовления концентрированных комбикормов на базе малых агропредприятий в последнее десятилетие привело к появлению большого ассортимента комбикормов от различных производителей.

Малые комбикормовые предприятия не обеспечены аналитической приборной базой и не осуществляют контроль качества производимой продукции посредством услуг химических лабораторий [2, 3]. Иногда заявленный состав не соответствует фактическому ввиду стремления производителя снизить себестоимость производимой продукции либо вследствие скрытной технической неисправности весоизмерительного оборудования.

Ранее проведенными нами исследованиям установлено, что каждый тип зерновой культуры имеет уникальные оптические свойства, который может быть распознан посредством измерения косвенных оптических параметров с использованием оптических приборов и фоточувствительных датчиков.

Спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона (БИК) широко используется для качественного и количественного анализа. По сравнению с традиционными методами аналитической химии спектроскопия видимого и ближнего инфракрасного диапазона имеет преимущества по скорости и эффективности, требует минимальной подготовки образцов (или она отсутствует) и применима ко многим типам образцов.

Портативные БИК-спектрометры имеют возможность проводить спектральный анализ

непосредственно на месте использования сырья или его переработки. Миниатюризация позволила использовать спектроскопию ближнего инфракрасного диапазона на практике в аналитических сценариях, недоступных для стандартного лабораторного оборудования. Преимущества миниатюрной спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона очевидны при быстром и неразрушающем анализе на месте [4, 5], например, агропродовольственных товаров [6]. Так, инфракрасная спектроскопия используется для обнаружения меламина в соевом шроте [7], обнаружения обработанных животных белков в кормах [8] и диагностики многих других биологических объектов [9].

С учетом опыта ранее проведенных исследований перспективным является использование метода спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения для экспресс-диагностики комбикорма.

Цель исследований: изучение возможностей диагностики комбикорма методом спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения и определение информативных спектральных диапазонов.

Задачами исследований являлось измерение спектральных характеристик гранулированного и молотого комбикорма и его составляющих, вычисление параметров спектров и нахождение диапазонов, наиболее подходящих для диагностики.

Материалы и методы

Для исследований были использованы образцы четырехкомпонентного комбикорма, состоящего из молотой кукурузы (38%), шрота рапсового (27%), жома свекловичного (20%), барды кукурузной (15%) и двухкомпонентного комбикорма, включающего в себя ячмень (63%) и кукурузу (37%). Спектры поглощения

2- и 4-компонентного комбикорма сравнивались со спектральной характеристикой клетчатки.

Измерение спектров отражения и поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне проводили на приборе Foss NIRS2500 (Foss, Дания) (рис. 1).

Рабочий спектральный диапазон охватывает значительную часть видимого и ближнего инфракрасного излучения (400...2500 нм), спектральное разрешение 0,5 нм.

Были определены интегральные коэффициенты поглощения в спектральном диапазоне $\lambda_1 \dots \lambda_2$:

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda) d\lambda, \tag{1}$$

где $\alpha(\lambda)$ – спектральная характеристика поглощения; λ_1, λ_2 – границы спектрального диапазона, нм.



Рис. 1. Прибор Foss NIRS2500 с образцами комбикорма

Fig. 1. Foss NIRS2500 device with feed samples

Относительные погрешности ϵ определения коэффициента поглощения при многократных измерениях ($n = 10$) вычисляли по общепринятым формулам.

Для анализа полученных спектров вычисляли математическое ожидание M_λ :

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \alpha(\lambda) d\lambda, \tag{2}$$

где $\alpha(\lambda)$ – распределение плотности вероятности; λ_1, λ_2 – минимальное и максимальное значение длин волн диапазона, нм.

Результаты и их обсуждение

Для проведения теоретической оценки и определения перспективы использования методов спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения для экспресс-диагностики концентрированного комбикорма были измерены оптические свойства 4-компонентного комбикорма и его составляющие по отдельности.

Измеряли спектральные характеристики поглощения в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм. При этом ближний инфракрасный спектр (0,8...2,5 мкм) регистрирует обертоновые и комбинированные полосы молекулярных колебаний [10].

Результаты измерения комбикорма и его составляющих представлены на рисунке 2.

Полученные характеристики свидетельствуют о том, что во всех исследованных образцах имеются максимумы при длине волны 0,46; 1,2; 1,45; 1,73; 1,93; 2,06; 2,3 мкм. Аналогичный вид спектров

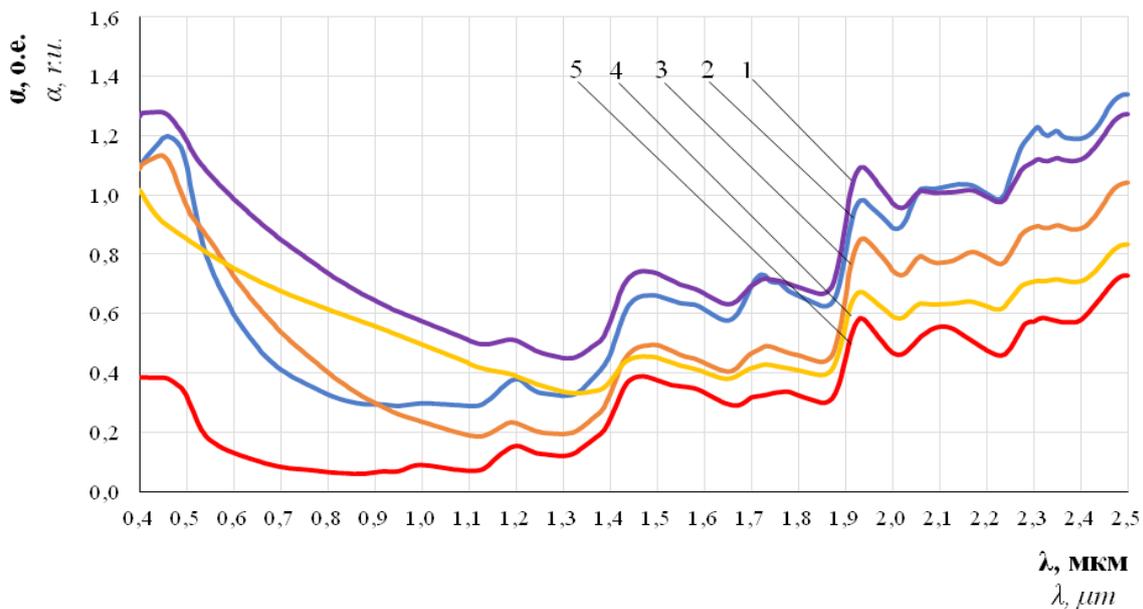


Рис. 2. Спектры поглощения кормовой продукции:

1 – комбикорм четырехкомпонентный молотый; 2 – барда кукурузная; 3 – шрот рапсовый; 4 – жом свекловичный; 5 – кукуруза молотая

Fig. 2. Absorption spectra of feed products:

1 – four-component ground compound feed, 2 – corn stillage, 3 – rapeseed meal, 4 – beet pulp, 5 – ground corn

в видимой и ближней инфракрасной области получен для размолотой пшеницы [11].

В коротковолновой области имеются отличия в спектре свекловичного жома: отсутствуют максимумы на длине волны 0,46 и 1,2 мкм, у молотой кукурузы имеется максимум примерно на 2,11 мкм.

В целом комбикорм имеет наибольшее поглощение во всем исследованном диапазоне, что можно объяснить аддитивным сложением поглощательных свойств всех его составляющих.

В длинноволновой половине спектрального диапазона (1,4...2,5 мкм) наблюдается наибольшее поглощение у комбикорма и барды, затем следуют шрот, жом и кукуруза.

Для всех образцов характеристики $\alpha(\lambda)$ имеют минимум в области 1,0...1,87 мкм, а на краях исследованного спектрального диапазона поглощение увеличивается. Сильные пики и впадины с наибольшим весом являются чувствительными длинами волн для прогнозирования содержания крахмала – такие, как 1210...1222, 1575...1625 и 2333...2356 нм [12]. Некоторые из них соответствуют пикам поглощения, связанным с С-Н растяжением крахмала.

Величина математического ожидания M_λ сильно отличается во всех образцах: наименьшее ее значение наблюдается у свекловичного жома ($M_\lambda = 1433$ нм), затем следуют комбикорм ($M_\lambda = 1497$ нм), рапсовый шрот ($M_\lambda = 1540$ нм), барда ($M_\lambda = 1620$ нм) и кукуруза ($M_\lambda = 1765$ нм). Это связано с расположением кривых $\alpha(\lambda)$ в коротковолновой и длинноволновой областях спектра.

Отметим, что математическое ожидание комбикорма никак не коррелируется с математическими ожиданиями его компонентов при учете их массовой доли и, следовательно, не может быть использовано для контроля состава и качества смешивания. Однако интегральные коэффициенты поглощения в различных диапазонах $\lambda_1... \lambda_2$ (табл. 1), рассчитанные по формуле (1), являются статистически

достоверными и различаются во всех спектральных диапазонах, принадлежащих определенным максимумам (рис. 2).

Полученные данные дают возможность разработать оптическую технологию контроля качества смешивания комбикорма при изготовлении и дальнейшего контроля готового продукта.

Для длинноволновых диапазонов ($\lambda > 1,65$ мкм) коэффициенты поглощения A являются сравнительно близкими у комбикорма и барды. В диапазоне 1,65...2,40 мкм различие составит всего 0,6%.

В результате измерений было оценено влияние фракционного состава компонентов на точность измерения оптических параметров. Различия в подготовке образцов (помол или грануляция) [13] могут повлиять на спектральные характеристики (рис. 3).

Спектры молотого и гранулированного комбикорма качественно одинаковы во всем спектральном диапазоне, но интегральный коэффициент поглощения молотого комбикорма выше на 22%, что объясняется его меньшим отражением по сравнению с гранулированным, где имеется некоторый отражательный «глянец».

Особый интерес представляют результаты сравнения спектров поглощения 4-компонентного комбикорма, клетчатки и 2-компонентного комбикорма (рис. 4).

Ввиду того, что фальсификация комбикормов происходит путем замены энергетически ценного дорогого сырья на более дешевое (например, отруби или шелуху зерновых культур), наибольший интерес представляет спектральная характеристика клетчатки, которая преобладает в подобном дешевом сырье.

На рисунке 4 можно увидеть, что характерные для клетчатки максимумы 1206, 1450, 1820, 1940, 2300 нм и минимумы 1664, 2000, 2242 [12] совпадают с полученными результатами измерения молотого 2-компонентного комбикорма.

Интегральные коэффициенты поглощения четырехкомпонентного комбикорма и его составляющих для различных спектральных диапазонов

Таблица 1

Integral absorption coefficients of four-component compound feed and its components for various spectral ranges

Table 1

Образец Sample	A±ΔA, о.е., для спектрального диапазона, мкм / A±ΔA, r.u., for the spectral range, μm						
	0,40...0,54	1,13...1,22	1,36...1,65	1,65...1,86	1,86...2,02	2,02...2,23	2,23...2,40
Комбикорм / Compound feed	171±1	46±1	195±3	145±2	153±1	212±2	187±2
Барда / Corn stillage	154±1	32±1	172±1	141±1	138±1	214±1	200±1
Шрот / Oil cake (rapeseed meal)	146±1	20±1	125±1	97±1	115±1	166±1	149±1
Жом / Beet pulp	125±2	37±1	120±3	86±5	93±3	133±12	119±8
Кукуруза / Corn	47±8	11±1	95±9	67±5	76±9	109±11	95±10

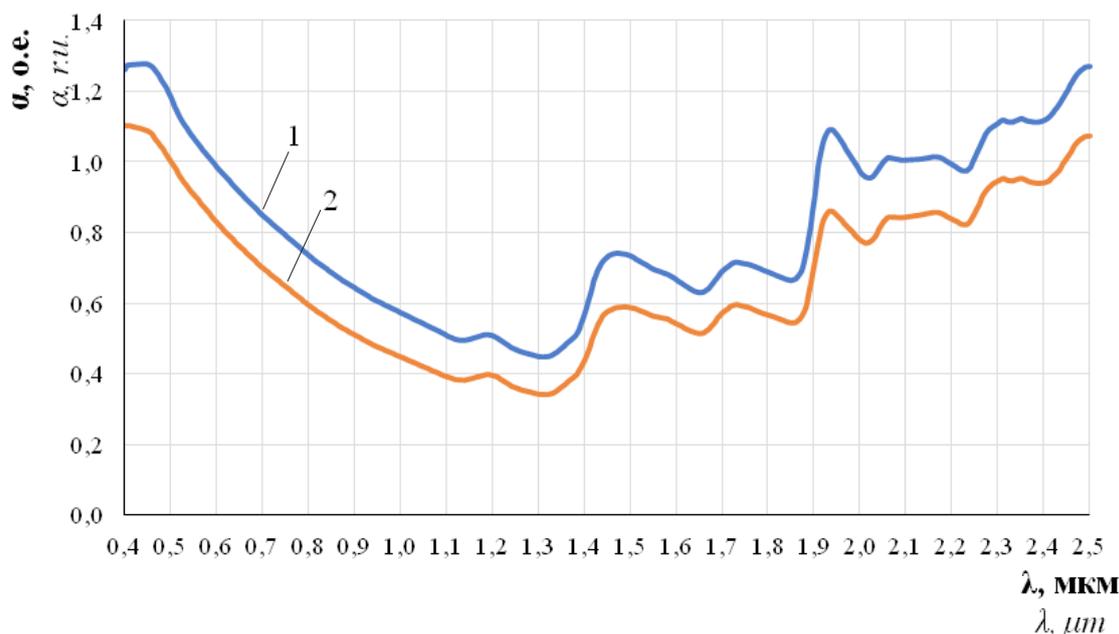


Рис. 3. Спектры поглощения четырехкомпонентного комбикорма:
1 – молотого; 2 – гранулированного

Fig. 3. Absorption spectra of four-component compound feed:
1 – ground; 2 – granulated

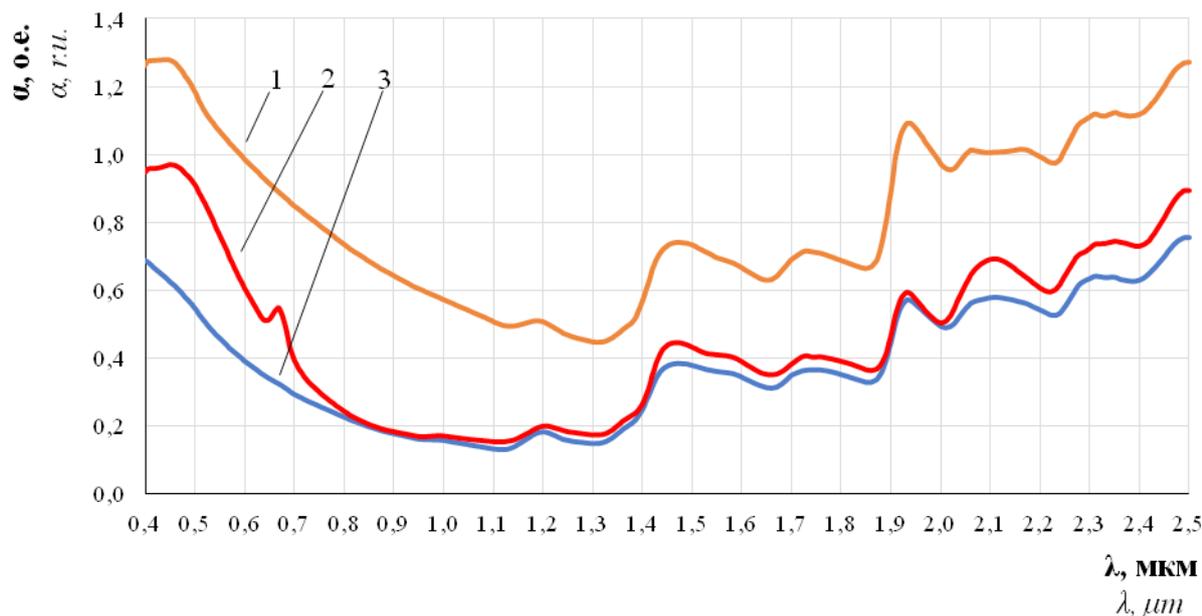


Рис. 4. Спектры поглощения молотого комбикорма и клетчатки:
1 – комбикорм четырехкомпонентный; 2 – клетчатка; 3 – комбикорм двухкомпонентный

Fig. 4. Absorption spectra of ground compound feed and fiber:

1 – four-component compound feed; 2 – fiber; 3 – two-component compound feed

Максимум 1820 нм отсутствует как в чистой клетчатке, так и в образцах комбикорма, а максимум 2300 нм выражен слабо в отличие от соседнего максимума 2310 нм, характерного для липидов. Из данных рисунка 4 следует, что в диапазоне 0,4...0,8 мкм спектры наиболее различаются. В диапазоне 0,8...1,4 мкм спектр клетчатки практически не отличается от спектра 2-компонентного комбикорма.

В более длинноволновых диапазонах отличия более заметны и увеличиваются с увеличением длины волны.

Интегральные коэффициенты поглощения для различных диапазонов $\lambda_1... \lambda_2$ представлены в таблице 2.

Можно сделать вывод о том, что диагностику фальсификации на предмет избыточного содержания

Интегральный коэффициент поглощения молотого комбикорма и клетчатки для различных спектральных диапазонов

Integral absorption coefficients of various types of ground compound feed and fiber for various spectral ranges

Образец Sample	A±ΔA, о.е., для диапазона, мкм / A±ΔA, r.u., for the spectral range, μm			
	0,4...0,8	0,8...1,4	1,4...2,0	2,0...2,5
Комбикорм четырехкомпонентный молотый Four-component compound feed	404±4	330±6	450±7	535±5
Клетчатка / Fiber	255±1	111±4	251±2	347±2
Комбикорм двухкомпонентный молотый Two-component compound feed	168±8	100±5	228±14	301±16

клетчатки необходимо проводить в диапазоне 0,8...1,4 мкм, а диапазон 0,4...0,8 мкм является неинформативным, тем более что в спектре комбикормов полностью отсутствует характерный для клетчатки пик 0,67 мкм.

Потенциальным технологическим эффектом применения метода спектроскопии видимого и ближнего инфракрасного излучения является сокращение временных издержек, связанных с проведением химического анализа комбикорма на предмет соответствия заявленной рецептуре, а также облегчение проведения мероприятий на животноводческом комплексе, связанных с менеджментом кормления и предполагающих корректировку рациона.

Измерения можно проводить как на специализированном лабораторном спектрометре, так и на более дешевых портативных узкоспектральных фотометрах, работающих в определенных (наиболее информативных) диапазонах.

Список источников

1. Дорохов А.С., Бельшклина М.Е. Концепция формирования инновационного агропромышленного соевого кластера в Дальневосточном регионе // *Аграрная Россия*. 2020. № 3. С. 41-48. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-3-41-48>
2. Дорохов А.С., Бельшклина М.Е., Болшева К.К. Производство сои в Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 3 (47). С. 25-33. EDN: DXORYI
3. Морозов Н.М., Кирсанов В.В., Ценч Ю.С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 1. С. 11-18. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
4. Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremenkov I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y. Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(3):51-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>
5. Pavkin D.Yu., Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremenkov I.Yu., Golyshkov I.A. Determination of the dependences

Выводы

1. Наибольшее отличие поглощательных свойств отдельных составляющих комбикорма наблюдается либо в коротковолновом диапазоне 0,4...1,2 мкм, либо в диапазоне свыше 1,65 мкм. Спектральные характеристики поглощения $\alpha(\lambda)$ в коротковолновом диапазоне менее системны, что требует выделения более узких спектральных интервалов, например: 0,40...0,54 или 1,13...1,22 мкм.

2. Отличие спектральных поглощающих свойств различных комбикормов наиболее проявляется в коротковолновой области ($\lambda < 1,36$ мкм). Для клетчатки наибольшее различие наблюдается в области менее 800 нм.

3. Найденные информативные спектральные диапазоны могут использоваться при разработке оптических методик и датчиков для экспресс-диагностики качества (соответствия заявленной рецептуре и компонентному составу) концентрированных комбикормов для животноводства.

References

1. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E. Concept of forming an innovative agro-industrial soy cluster in the Far Eastern region. *Agrarnaya Rossiya*. 2020;3:41-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2020-3-41-48>
2. Dorokhov A.S., Belyshkina M.E., Bolsheva K.K. Soy production in the Russian Federation: basic trends and development prospects. *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2019;3(47):25-33. (In Russ.)
3. Morozov N.M., Kirsanov V.V., Tsench Yu.S. Historical and Analytical Assessment of Automation and Robotization for Milking Processes *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):11-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-11-18>
4. Nikitin E.A., Belyakov M.V., Efremenkov I.Yu., Blagov D.A., Mamedova R.A., Sviridov A.S., Alipichev A.Y. Non-contact assessment of the nutritional value of feed with optical technologies. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(3):51-57. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-51-57>
5. Pavkin D.Yu., Belyakov M.V., Nikitin E.A., Efremenkov I.Yu., Golyshkov I.A. Determination of the dependences of the nutritional value of corn silage and photoluminescent

of the nutritional value of corn silage and photoluminescent properties. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(18):10444. <https://doi.org/10.3390/app131810444>

6. Grabska J., Beć K.B., Huck C.W. Miniaturized Near-Infrared Spectroscopy – The Ultimate Analytical Tool in Food and Agriculture. *Infrared Spectroscopy*. 2022. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9790>

7. Yang Z., Han L., Wang C., Li J., Fernandez P., Juan A., Dardenne P., Baeten V. Detection of melamine in soybean meal using near-infrared microscopy imaging with pure component spectra as the evaluation criteria. *Journal of Spectroscopy*. 2016;2016(6). <https://doi.org/10.1155/2016/5868170>

8. Liu X., Han L., Veys P., Baeten V., Jiang X., Dardenne P. An overview of the legislation and light microscopy for detection of processed animal proteins in feeds. *Microscopy Research and Technique*. 2011;74(8):735-743. <https://doi.org/10.1002/jemt.20951>

9. Bec K.B., Grabska J., Huck C.W. Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*. 2020;25(12):2948. <https://doi.org/10.3390/molecules25122948>

10. Chalmers J.M. *Spectroscopy in process analysis (Sheffield Analytical Chemistry)*, England: Sheffield Academic Press; Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. 380 p.

11. Badaro A.T., Morimitsu F.L., Ferreira A.R., Clerici M.T.P.S., Barbin D.F. Identification of fiber added to semolina by near infrared (NIR) spectral techniques. *Food Chemistry*. 2019;289:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.057>

12. Du Z., Tian W., Tilley M., Wang D., Zhang G., Li Y. Quantitative assessment of wheat quality using near-infrared spectroscopy: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21:2956-3009. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12958>

13. Bao J., Shen Y., Jin L. Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science*. 2007;46(1):75-81. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.12.002>

properties. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(18):10444. <https://doi.org/10.3390/app131810444>

6. Grabska J., Beć K.B., Huck C.W. Miniaturized Near-Infrared Spectroscopy – The Ultimate Analytical Tool in Food and Agriculture. *Infrared Spectroscopy*. 2022. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9790>

7. Yang Z., Han L., Wang C., Li J., Fernandez P., Juan A., Dardenne P., Baeten V. Detection of melamine in soybean meal using near-infrared microscopy imaging with pure component spectra as the evaluation criteria. *Journal of Spectroscopy*. 2016;2016(6). <https://doi.org/10.1155/2016/5868170>

8. Liu X., Han L., Veys P., Baeten V., Jiang X., Dardenne P. An overview of the legislation and light microscopy for detection of processed animal proteins in feeds. *Microscopy Research and Technique*. 2011;74(8):735-743. <https://doi.org/10.1002/jemt.20951>

9. Bec K.B., Grabska J., Huck C.W. Near-infrared spectroscopy in bio-applications. *Molecules*. 2020;25(12):2948. <https://doi.org/10.3390/molecules25122948>

10. Chalmers J.M. *Spectroscopy in process analysis (Sheffield Analytical Chemistry)*, England: Sheffield Academic Press; Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. 380 p.

11. Badaro A.T., Morimitsu F.L., Ferreira A.R., Clerici M.T.P.S., Barbin D.F. Identification of fiber added to semolina by near infrared (NIR) spectral techniques. *Food Chemistry*. 2019;289:195-203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.057>

12. Du Z., Tian W., Tilley M., Wang D., Zhang G., Li Y. Quantitative assessment of wheat quality using near-infrared spectroscopy: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21:2956-3009. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12958>

13. Bao J., Shen Y., Jin L. Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy. *Journal of Cereal Science*. 2007;46(1):75-81. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.12.002>

Информация об авторах

¹ **Беляков Михаил Владимирович**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; SPIN-код: 2864-9937, AuthorID: 745187; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² **Никитин Евгений Александрович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 7453-6947, AuthorID: 960848; evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

³ **Пятченков Денис Сергеевич**, специалист; denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

^{1,2,3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

М.В. Беляков – определил стратегию проведения исследований и разработал методику проведения исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Е.А. Никитин – произвел литературный обзор рукописи и обосновал актуальность, создание черновика рукописи;

Д.С. Пятченков – производил лабораторные измерения и статистическую обработку данных.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 08.08.2024, после рецензирования и доработки 06.09.2024; принята к публикации 23.12.2024.

Author Information

¹ **Mikhail V. Belyakov**, DSc (Eng), Chief Research Engineer; bmw20100@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>

² **Evgeniy A. Nikitin**, CSc (Eng), Senior Research Engineer; evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

³ **Denis S. Pyatchenkov**, specialist, denis.piat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5903-6142>

^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institute passage, 5

Author Contribution

M.V. Belyakov – conceptualization, methodology, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;

E.A. Nikitin – literature review, conceptualization, methodology, writing – original draft preparation, review and editing of the manuscript;

D.S. Pyatchenkov – investigation, statistical data curation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 08.08.2024; Revised 06.09.2024; Accepted 23.12.2024