

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1171-1178>

УДК 631.363:535-15



Применимость метода инфракрасной спектроскопии среднего диапазона для установления качественных показателей комбикорма

© 2024. М. В. Беляков✉, Е. А. Никитин

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,

г. Москва, Российская Федерация

Цель исследований – изучение функциональных возможностей средневолновой инфракрасной спектроскопии для определения качественных показателей концентрированного комбикорма. В работе исследовали содержание питательных веществ (суммарное количество аминокислот и углеводов) методом отражательной инфракрасной спектроскопии в 4-компонентном комбикорме и сопоставляли с результатами химического анализа, выполняемого арбитражными методами. Исследованы оптические свойства и проведен сравнительный анализ всех 4 составляющих комбикорма (молотое зерно кукурузы, жом свекловичный, барда кукурузная, шрот рапсовый). Впервые получены спектральные характеристики поглощения комбикорма и его компонентов в средней инфракрасной области, выявлен репрезентативный диапазон для определения показателей качества. Инфракрасные спектры были получены с использованием микроскопа МИКРАН-3, соединенного с ИК-Фурье спектрометром СИМЕКС ФТ-801 с применением алгоритма Савицкого-Голея. Установлено, что спектральные характеристики поглощения $\alpha(k)$ имеют область максимума 710–1275 см⁻¹ для всех компонентов комбикорма. Сам максимум находится в диапазоне 1060–1090 см⁻¹. Характеристики качественно схожи, но наибольшее отражение в области максимума характерно для молотой кукурузы, наименьшее – для рапсового шрота. Получены интегральные параметры отражения в областях поглощения белков, жиров и углеводов с погрешностью не более 7,2 %. Свекловичный жом поглощает больше других компонентов в диапазоне 800–1170 см⁻¹. У кукурузной барды и молотой кукурузы поглощение примерно совпадает для каждого диапазона. В областях поглощения белков значение коэффициента поглощения существенно меньше, и различие в абсолютных величинах менее заметно. Предполагается, что отражение в области максимума характеристики $\alpha(k)$ наиболее зависит от содержания углеводов в исследуемых компонентах.

Ключевые слова: компоненты комбикорма, неразрушающие методы контроля, оптическое излучение

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0014).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беляков М. В., Никитин Е. А. Применимость метода инфракрасной спектроскопии среднего диапазона для установления качественных показателей комбикорма. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(6):1171–1178. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1171-1178>

Поступила: 19.06.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

Опубликована онлайн: 25.12.2024

The applicability of the mid-range infrared spectroscopy method to establish the quality indicators of compound feed

© 2024. Mikhail V. Belyakov✉, Evgeny A. Nikitin

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The purpose of the research is to study the functional capabilities of medium-wave infrared spectroscopy to determine the quality indicators of concentrated compound feed. The study investigated the nutrient content (the total number of amino acids and carbohydrates) by reflective infrared spectroscopy in 4-component compound feed and compared with the results of chemical analysis performed by arbitration methods. The optical properties were investigated and a comparative analysis of all 4 components of the feed was carried out (ground corn grain, beet pulp, corn bard, rapeseed meal). For the first time, spectral absorption characteristics of compound feed and its components in the mid-infrared area were obtained and a representative range for determining quality indicators was revealed. The infrared spectra were obtained using a MICRAN-3 microscope connected to the SIMEX FT-801 infrared Fourier spectrometer using the Savitsky-Goley algorithm. It has been established that the spectral absorption characteristics of $\alpha(k)$ have a maximum range of 710–1275 cm⁻¹ for all feed components. The maximum

itself is at 1060–1090 cm^{-1} . The characteristics are qualitatively similar, but the largest reflection in the maximum area is characteristic of ground corn, and the smallest is for rapeseed meal. Integral reflection parameters were obtained in the absorption areas of proteins, fats and carbohydrates with an error of no more than 7.2 %. Beet pulp absorbs more than other components in the range of 800–1170 cm^{-1} . For corn bard and ground corn, the absorption is approximately the same for each range. In the areas of protein absorption, the value of the absorption coefficient is significantly lower and the difference in absolute values is less noticeable. It is assumed that the reflection of the $a(k)$ characteristic in the maximum area is most dependent on the carbohydrate content in the studied components.

Keywords: compound feed components, non-destructive testing methods, optical radiation

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0014).

The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Belyakov M. V., Nikitin E. A. The applicability of the mid-range infrared spectroscopy method to establish the quality indicators of compound feed. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(6):1171–1178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1171-1178>

Received: 19.06.2024

Accepted for publication: 28.11.2024

Published online: 25.12.2024

Несмотря на стремительный рост приоритетов развития пищевой промышленности в пользу продукции растительного происхождения, животноводство, в частности содержание крупного рогатого скота в целях получения мясной и молочной продукции, по сей день остается приоритетным направлением сельскохозяйственной деятельности большинства стран мира, формирующим продовольственную безопасность [1, 2].

Сегодня современные животноводческие комплексы по получению молока и мясной продукции – это предприятия с высоким уровнем автономности процессов, в которых задействованы инструменты цифровизации, но это не отменяет необходимость участия человека на 100 %. В пристальном внимании нуждаются процессы, связанные с кормлением, которые формируются из длинной цепочки последовательных технологических операций, выполняемых механизированными средствами, роботами, а также непосредственно человеком [3, 4].

В первую очередь вопросы планирования объемов заготовки кормовой базы, а также составление рациона кормления животных на основе химического анализа требуют непосредственного участия человека в принятии решения [5].

Сегодня составление рациона на современной ферме начинается с проведения предварительных анализов корма на предмет содержания сухого вещества, протеинов, жиров, углеводов и других питательных элементов, которые определяют продуктивность поголовья и влияют на его здоровье [6, 7].

Большая часть предприятий определяет питательную ценность приобретаемых и выращиваемых кормов с использованием услуг сторонних организаций (специализированные

лаборатории и консалтинговые компании), которые, в свою очередь, решают эти задачи трудоемкими арбитражными химическими методами, посредством титриметрических и хроматографических методов с использованием бюреток, автотитраторов с каруселью титруемых образцов, газовых и жидкостных хроматографов, они сложны и относятся к методам разрушающего контроля, требуют сложнейшего аппаратного оформления, значительных трудозатрат, большого количества реактивов и расходных материалов, что в конечном итоге определяет себестоимость производства молока и говядины [8, 9].

Гипотеза настоящего исследования заключается в определении возможности использования метода инфракрасной спектроскопии для экспресс-диагностики питательной ценности концентрированных комбикормов и их составляющих. ИК-спектроскопия уже применяется в приборах медицинского назначения, дефектоскопах и другом лабораторном оборудовании. Существуют и оптические анализаторы корма, функционирующие на основе подобного метода, однако их функциональные параметры ограничивают их широкую применимость в сельском хозяйстве. Ввиду использования энергосберегающих галогенных ламп в качестве оптического источника излучения все приборы имеют стационарное исполнение и вместе с этим остро стоит вопрос миниатюризации и использования диодных источников излучения [10].

Настоящее исследование направлено на выявление оптических свойств методами ИК-спектроскопии в продуктах переработки, используемых в комбикормовой промышленности. Формирование теоретических основ построения новой лабораторной базы с унифицированным многоцелевым назначением.

Цель исследований – изучение функциональных возможностей средневолновой инфракрасной спектроскопии для определения качественных показателей концентрированного комбикорма.

Научная новизна – впервые получены спектральные характеристики поглощения комбикорма и его компонентов в средней инфракрасной области, выявлен репрезентативный диапазон для определения показателей качества.

Материал и методы. Для работы использовали 4-компонентный концентрированный комбикорм, изготовленный в виде гранул (рис. 1), с использованием шрота рапсового 27 % (отход, полученный в ходе экстракции масла, прошедший тостирование – дополнительную влаготепловую обработку паром под давле-

нием), измельченного зерна кукурузы 38 %, измельченного свекловичного жома 20 %, барды кукурузной 15 % (побочный продукт заключительного этапа спиртового производства).

Измельчение компонентов комбикорма производилось до видимой однородности в лабораторных условиях с использованием лабораторной мельницы.

Исследование предполагало сопоставление фактического содержания питательных веществ (аминокислот и углеводов) в комбикорме и его компонентах арбитражными методами (табл. 1) с оптическими свойствами, которые регистрировались посредством метода отражательной инфракрасной спектроскопии на инфракрасном микроскопе МИКРАН-3 (рис. 2) [11].

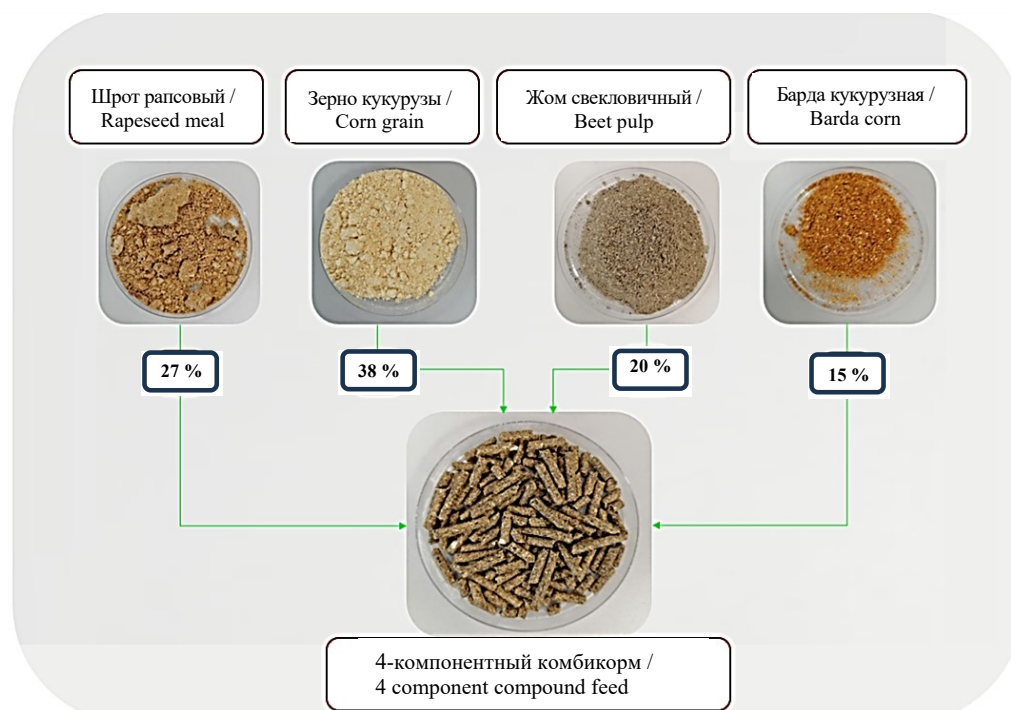


Рис. 1. Внешний вид и состав комбикорма /
Fig. 1. Appearance and composition of compound feed

Таблица 1 – Содержание аминокислот и углеводов в комбикорме и его компонентах, мг/100 г /
Table 1 – The content of amino acids and carbohydrates in compound feed and its components, mg/100 g

Образец / Sample	Тирозин / Tyrosine	Фенилаланин / Phenylalanine	Углеводы (сахароза, фруктоза, глюкоза) / Carbohydrates (sucrose, fructose, glucose)
Жом свекловичный / Beet pulp	811,0±57,6	1424,3±106,8	138,0±17,9
Барда кукурузная / Barda corn	1049,9±74,5	1280,8±96,1	130,5±17,0
Кукуруза молотая / Ground corn	333,4±23,7	413,8±31,0	2020,3±262,6
Шрот рапсовый / Rapeseed meal	1143,3±81,2	1678,0±125,9	105,0±13,7
Комбикорм / Compound feed	916,7±65,1	1352,1±101,4	137,8±17,9

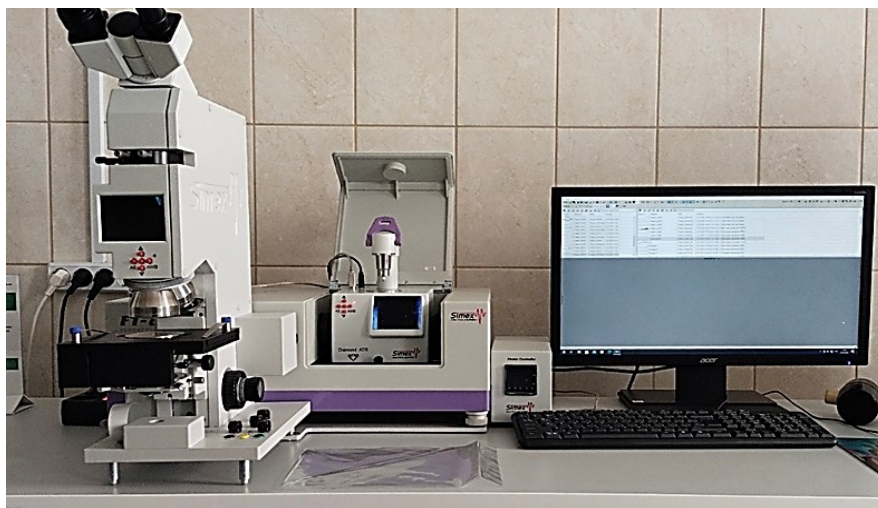


Рис. 2. Внешний вид
спектроскопического
комплекса /
Fig. 2. The appearance
of the spectroscopic complex

Инфракрасные спектры получены с использованием МИКРАН-3, соединенного с ИК-Фурье спектрометром СИМЕКС ФТ-801 в режиме диффузного отражения. Обработку инфракрасных спектров производили с помощью фирменного программного обеспечения компании Симекс ZaIR 3.5. Математическая обработка выполнена в Microsoft Excel, Origin 8 Pro с применением алгоритма Савицкого-Голея.

Для получения репрезентативных градуировочных кривых оптические измерения производились с 50-кратной повторностью для каждого компонента и комбикорма в частности.

Качество проведения оптического сигнала определяли четкостью микрофотографии измеряемого образца, которая характеризует плотность прилегания измерительной головки к образцу и отображает её микроструктуру.

Результаты и их обсуждение. Проведены оптические измерения компонентов концентрированного комбикорма с использованием МИКРАН-3, соединенного с ИК-Фурье спектрометром СИМЕКС ФТ-801 в режиме диффузного отражения (рис. 3).

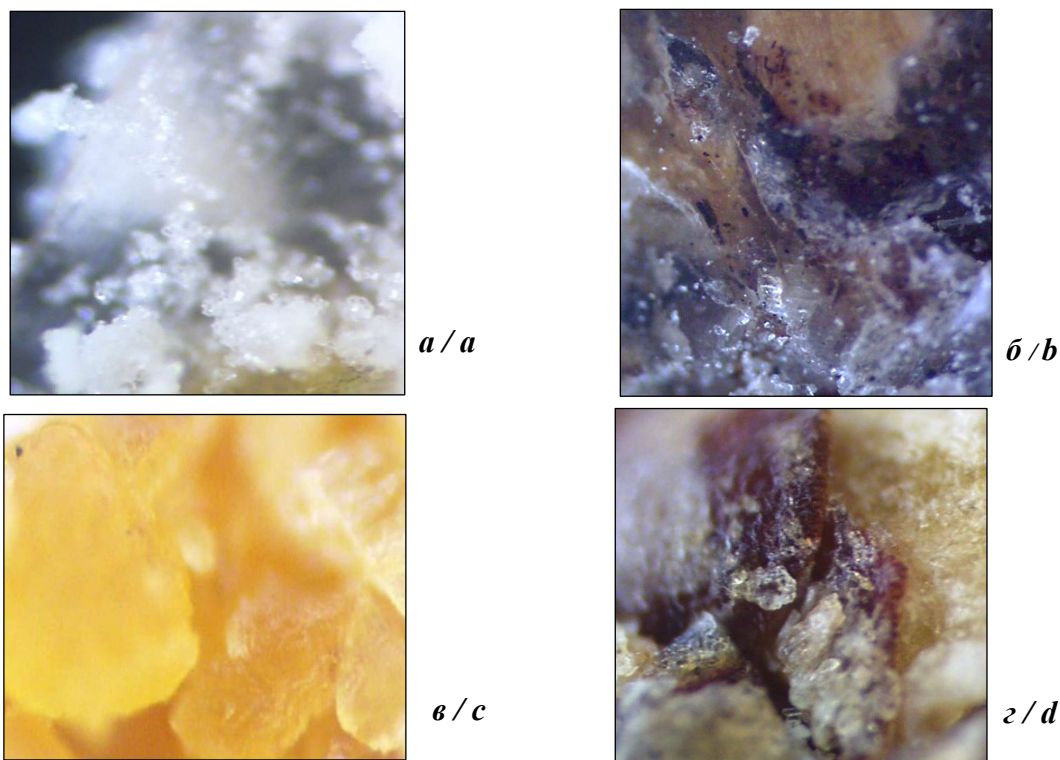


Рис. 3. Микрофотографии основных компонентов комбикорма: *a* – микроструктура кукурузы, *б* – микроструктура жома, *в* – микроструктура барды, *з* – микроструктура шрота /

Fig. 3. Micrographs of the main components of compound feed: *a* – microstructure of corn, *b* – microstructure of pulp, *c* – microstructure of barda, *d* – microstructure of meal

Полученные микрофотографии каждого из образцов с 20-кратным увеличением при плотном прилегании измерительной головки к образцу отображают состояние микро-структуры компонентов

Анализ микроструктуры компонентов и концентрированного комбикорма (рис. 4) также позволяет оценивать однородность. Например, у кукурузной барды однородность чётко выраженная, в меньшей степени она проявляется

у размолотой кукурузы. Для остальных составляющих однородность существенно меньше, что вызвано разнородной структурой материала первичной переработки.

В результате исследования оптических свойств были получены усредненные по результатам десяти измерений спектральные характеристики поглощения $\alpha(k)$, представленные на рисунке 5.



Рис. 4. Микрофотография комбикорма /
Fig. 4. Micrography of compound feed

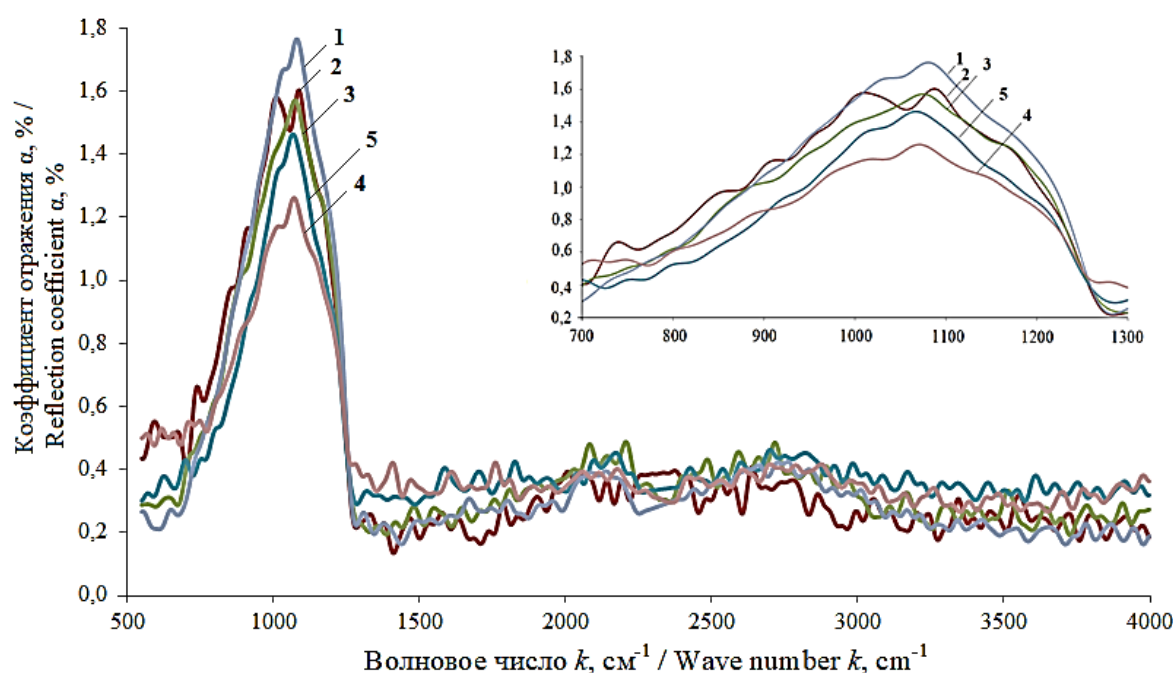


Рис. 5. Спектральные характеристики поглощения комбикорма (5) и его составляющих: молотой кукурузы (1), свекловичного жома (2), кукурузной барды (3) и рапсового шрота (4) /

Fig. 5. Spectral absorption characteristics of compound feed (5) and its components: ground corn (1), beet pulp (2), corn bard (3) and rapeseed meal (4)

Зависимости $\alpha(k)$ для всех образцов имеют область максимума 710–1275 см^{-1} , что соответствует диапазону длин волн примерно 8–12 $\mu\text{м}$.

Сам максимум находится в интервале 1060–1090 см^{-1} . Сравнивая характеристики, можно заметить, что они качественно схожи, но

наибольшее отражение в области максимума характерно для молотой кукурузы.

Меньшее значение максимума наблюдали для жома и барды, близкое к ним – для комбикорма в целом, а наименьшее отражение характерно для рапсового шрота.

Имеется широкая сложная полоса в районе 660–1294 см⁻¹, соответствующая колебаниям связи R-OH первичных, вторичных, третичных спиртов и простых эфиров:

- 660 см⁻¹ и 730 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH;
- 1007 см⁻¹ и 1035 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH первичных спиртов;
- 1080 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH первичных спиртов и простых эфиров;
- 1105 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH третичных спиртов.

Также выделяются отдельные полосы 1294, 1333, 1387 см⁻¹, соответствующие колебаниям связи R-OH вторичных спиртов, жиров; полосы 1470 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH третичных спиртов, 1580 см⁻¹ – колебаниям связи R-OH третичных спиртов, жиров, 1632 см⁻¹ – колебаниям непереносимых жирных кислот и NH₃⁺ аминокислот¹.

Таким образом, в спектре комбикорма и его составляющих присутствуют полосы, позволяющие определить суммарное количество белка, жиров и углеводов. При наложении друг на друга полосы образуют суперпозицию, что проявляется в спектре, полученном на рисунке 5.

Для спектра волновых чисел были определены интегральные коэффициенты поглощения в интервале 710–1275 см⁻¹:

$$A = \int_{k_1}^{k_2} \alpha(k) dk, \quad (1)$$

где $\alpha(k)$ – спектральная характеристика поглощения; k_1, k_2 – границы частотного спектрального диапазона.

Результаты расчета интегральных коэффициентов поглощения, а также погрешности их определения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Интегральные коэффициенты поглощения (A) и погрешности (ε) их определения для комбикорма и его составляющих, %

Образец / Sample	A	ε
Жом свекловичный / Beet pulp	5,02	2,4
Барда кукурузная / Barda corn	4,83	7,2
Кукуруза молотая / Ground corn	5,21	2,6
Шрот рапсовый / Rapeseed meal	4,64	5,3
Комбикорм / Compound feed	4,19	3,8

В областях поглощения углеводов, жиров и белков были определены интегральные коэффициенты поглощения A_k . Результаты расчетов представлены в таблицах 3 и 4.

Из данных таблицы 3 видно, что жом свекловичный поглощает больше других ком-

понентов в диапазоне 800–1170 см⁻¹, рапсовый шрот – наоборот, поглощает больше в диапазоне 1260–1410 см⁻¹, где отличие A_k от других компонентов составляет 1,15–1,73 раза. У кукурузной барды и молотой кукурузы поглощение примерно совпадает для каждого диапазона.

Таблица 3 – Интегральные коэффициенты (A_k , %) в областях поглощения ($k_1 - k_2$) углеводов / Table 3 – Integral coefficients (A_k , %) in the absorption areas ($k_1 - k_2$) of carbohydrates

Образец / Sample	Область поглощения углеводов, см ⁻¹ / Area of carbohydrate absorption, cm ⁻¹						
	800–920	1030–1125	1060–1150	1075–1100	1100–1170	1260–1350	1310–1410
Жом свекловичный / Beet pulp	1,08	1,58	1,42	0,46	1,01	0,22	0,23
Барда кукурузная / Barda corn	1,07	1,47	1,33	0,42	0,97	0,21	0,22
Кукуруза молотая / Ground corn	1,03	1,37	1,27	0,40	0,92	0,26	0,30
Шрот рапсовый / Rapeseed meal	0,91	1,15	1,05	0,33	0,77	0,36	0,38
Комбикорм / Compound feed	0,84	1,34	1,19	0,38	0,84	0,29	0,33

¹Тарасевич Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. М.: МГУ, 2012. 54 с.

Таблица 4 – Интегральные коэффициенты (A_k , %) в областях поглощения (k_1 – k_2) белков и жиров
Table 4 – Integral coefficients (A_k , %) in the absorption areas (k_1 – k_2) of proteins and fats

Образец / Sample	Область поглощения углеводов, см^{-1} / Area of carbohydrate absorption, cm^{-1}			
	1550–1650	1485–1550	1610–1660	3030–3130
Жом свекловичный / Beet pulp	0,26	0,16	0,14	0,29
Барда кукурузная / Barda corn	0,26	0,17	0,14	0,28
Кукуруза молотая / Ground corn	0,31	0,21	0,16	0,38
Шрот рапсовый / Rapeseed meal	0,36	0,22	0,19	0,33
Комбикорм / Compound feed	0,37	0,21	0,18	0,37

В целом между компонентами (например, между жомом и шротом, бардой и молотой кукурузой) прослеживается интересная тенденция: если в области 800 – 1170 см^{-1} поглощение больше другого, то в области 1260 – 1410 см^{-1} поглощение меньше, и наоборот. Поглощение комбикорма в «углеводных» областях примерно соответствует усредненному значению поглощения компонентов, кроме области 800 – 920 см^{-1} .

Из таблицы 4 следует, что в «белковых» и «жировых» областях поглощение существенно меньше и различие в абсолютных величинах менее заметно. Из компонентов комбикорма наибольшим поглощением обладает рапсовый шрот.

В целом отражение в области 710 – 1275 см^{-1} и ее максимум наиболее зависят от содержания углеводов в исследуемых компонентах.

Однако чувствительность отражательных свойств очень низкая: при изменении количественного содержания углеводов в 19 раз (от шрота к кукурузе) максимум отражения меняется незначительно – в 1,3 раза, а интегральные коэффициенты отражения – на более чем на 22 %. Вместе с тем, несмотря на

выявленные недостатки у метода ИК-спектроскопии имеются такие достоинства, как простота получения отраженного фотосигнала и простота приборной реализации метода.

Выводы.

1. В результате проведения исследований было выявлено, что наиболее репрезентативным диапазоном излучения для экспресс-определения протеина в концентрированных комбикормах с использованием спектроскопии является область 710 – 1275 см^{-1} . В более длинноволновом диапазоне имеется сильная зашумленность регистрируемого сигнала и отсутствие системности изменения спектров.

2. Интегральные оптические параметры отражения имеют низкую чувствительность к содержанию углеводов и основных аминокислот в компонентах комбикорма.

3. Результаты полученных исследований позволяют определить информативный спектральный диапазон для последующей разработки аналитической приборной базы для сельского хозяйства с использованием более портативных приборов, а также, возможно, сократить время анализа.

References

1. Fountas S., Carli G., Sorensen C. G., Tsiropoulos Z., Cavalaris C., Vatsanidou A., et al. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. Computers and electronics in agriculture. 2015;115:40–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.011>
2. Keim J. P., Charles H. B., Alomar D. Prediction of crude protein and neutral detergent fibre concentration in residues of in situ ruminal degradation of pasture samples by near-infrared spectroscopy (NIRS). Animal production science. 2015;56(9):1504–1511. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN14822>
3. Modrono S., Soldado A., Martinez-Fernandez A., de la Roza-Delgado B. Handheld NIRS sensors for routine compound feed quality control: Real time analysis and field monitoring. Talanta. 2017;162:597–603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.10.075>
4. Matuszek D. Fluorescence method for the assessment of homogeneity of granular mixtures. Journal of Central European Agriculture. 2017;18(4):851–863. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/18.4.1966>
5. Matuszek D., Bilos L. Use of fluorescent tracers for the assessment of the homogeneity of multicomponent granular feed mixtures. Przemysl Chemiczny. 2017;96(11):2356–2359. DOI: <https://doi.org/10.15199/62.2017.11.27>

6. 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. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7622>
7. Schneider L., Volkmann N., Kemper N., Spindler B. Feeding behavior of fattening bulls fed six times per day using an automatic feeding system. Frontiers in Veterinary Science. 2020;7:43. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00043>
8. Fernandez-Ahumada E., Garrido-Varo A., Guerrero-Ginel J. E. Feasibility of diode-array instruments to carry near-infrared spectroscopy from laboratory to feed process control. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008;56(9):3185–3192. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf073534t>
9. Nikitin E. A., Pavkin D. Yu., Izmailov A. Yu., Aksenov A. G. Assessing the homogeneity of forage mixtures using an RGB camera as exemplified by cattle rations. Applied Sciences. 2022;12(7):03230. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073230>
10. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105578>
11. Burmistrov D. E., Ignatenko D. N., Lednev V. N., Gudkov S. V., Pavkin D. Y., Khakimov A. R., et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. Photonics. 2021;8(12):551. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>

Сведения об авторах

✉ **Беляков Михаил Владимирович**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, e-mail: bmw20100@mail.ru

Никитин Евгений Александрович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Information about the authors

✉ **Mikhail V. Belyakov**, DSc in Engineering, chief researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, e-mail: bmw20100@mail.ru

Evgeniy A. Nikitin, PhD in Engineering, senior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

✉ – Для контактов / Corresponding author