

СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

УДК 633.1:535.372

DOI: 10.31367/2079-8725-2025-101-6-5-10

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА НУТА

М.Н. Московский, доктор технических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, лаборатория технологий и машин для послевороченной обработки зерна и семян, maxmoskovsky74@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-5727-8706;

М.В. Беляков, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, лаборатория инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, bmw2010@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-4371-8042;

И.Ю. Ефременков, младший научный сотрудник, лаборатория инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве, efremenkovigor55@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-2302-9773

ФГБНУ «Федеральный научный агрогинженерный центр ВИМ»,
109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Качественный посевной материал – одно из важнейших условий эффективности производства зерна и зернопродуктов. Для производства высококачественной продукции требуется больше растительного белка, источником которого является нут. При хранении зерна и семян очень важен контроль качественных показателей, который возможно осуществлять оптическими методами. Целью данного исследования является обоснование выбора информативных спектральных параметров для создания фотолюминесцентного метода диагностики нута. Исследовали оптические спектральные люминесцентные свойства среднеспелого сорта нута Память урожая 2024, 2019 и 2017 годов. Оптические измерения проводили на дифракционном спектрофлуориметре «CM2203». Получили спектры возбуждения (поглощения) и спектры люминесценции. Возбуждение нута происходит в диапазоне 250–550 нм и для всех исследованных образцов имеет максимумы 362 и 424 нм. Наибольшее различие интегрального параметра поглощения наблюдается в диапазоне возбуждения 370–500 нм. Получены интегральные параметры спектров люминесценции при возбуждениях 362 и 424 нм. Интегральные потоки фотолюминесценции зависят от времени хранения и содержания белков и жиров. Погрешность определения потоков не превышает 4,5 %. Наиболее информативная длина волн возбуждения выбрана из условия максимального уровня фотосигнала, минимальной погрешности определения потока и наибольшего увеличения потока для разных значений содержания белка и жира. Наилучшей является длина волны возбуждения 424 нм. Диапазон регистрации фотолюминесцентного излучения при данном возбуждении находится на длинах волн 480–650 нм. Полученные результаты будут положены в основу разработки фотолюминесцентного метода контроля параметров нута в процессе длительного хранения.

Ключевые слова: нут, параметры зерна, оптические свойства, фотолюминесценция.

Для цитирования: Московский М.Н., Беляков М.В., Ефременков И.Ю. Фотолюминесцентная диагностика нута // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 6. С. 5–10. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-101-6-5-10.



PHOTOLUMINESCENT DIAGNOSTICS OF CHICKPEAS

М.Н. Moskovsky, Doctor of Technical Sciences, professor of RAS, main researcher, laboratory of technologies and machines for post-harvest processing of grain and seeds, maxmoskovsky74@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-5727-8706;

М.В. Belyakov, Doctor of Technical Sciences, associate professor, main researcher, laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, bmw2010@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-4371-8042;

I.Yu. Efrremenkov, junior researcher, laboratory of innovative technologies and technical means of feeding in animal husbandry, efremenkovigor55@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-2302-9773

FSBSI “Federal Research AgroEngineering Center VIM”,
109428, Moscow, 1-st Institutsky Pr., 5

High-quality seed material is a critical factor in the efficient production of grain and its products. Producing high-quality products requires more plant protein, a source of which is chickpeas. Quality control, which can be accomplished using optical methods, is of great importance when storing grain and seeds. The purpose of the current study was to validate the selection of informative spectral parameters to develop a photoluminescence diagnostic method for chickpeas. There were studied the optical spectral luminescence properties of middle-maturing chickpeas ‘Pamyat’ harvested in 2024, 2019, and 2017. Optical measurements were performed using a diffraction spectrum fluorimeter ‘CM2203’. There have been obtained excitation (absorption) and luminescence spectra. Chickpea excitation was in the range of 250–550 nm, with maxima at 362 and 424 nm for all samples studied. The greatest difference in the integral absorption parameter was in the excitation range of 370–500 nm. There were obtained integral parameters of the luminescence spectra at excitation wavelengths of 362 and 424 nm. Integral photoluminescence fluxes depended on storage time and percentage of protein and oil in seed. The error in determining the fluxes did not exceed 4.5 %. The most informative excitation wavelength was selected based on the condition of the maximum photo

signal level, minimum error in determining the flux, and the greatest flux increase for different values of protein and oil percentage. The optimal excitation wavelength was 424 nm. The photoluminescence emission detection range for this excitation wavelength was 480–650 nm. The results obtained could form the basis to develop a photoluminescence method for monitoring chickpea parameters during long-term storage.

Keywords: chickpeas, grain parameters, optical properties, photoluminescence.

Введение. Обеспечение качественным посевным материалом является одним из первичных и важнейших условий эффективности производителей зерна и зернопродуктов. При хранении зерна и семян очень важен контроль качественных показателей в соответствии с установленными требованиями, нормами, пригодными для длительного срока хранения без потерь технологических свойств и посевных качеств. Кроме того, для производителей зерна обеспечение безопасных запасов в хранилищах или зерноскладах – важный показатель, напрямую связанный с развитием самого предприятия (Исаков и Айбек, 2023).

Для производства высококачественной животноводческой продукции нужно больше растительного белка. Для создания стабильной кормовой базы в животноводстве требуется поиск альтернативных источников кормового белка за счет различных нетрадиционных сельскохозяйственных культур, в том числе зернобобовых (Сазонова и др., 2024). В условиях Российской Федерации источником пополнения белка и повышения качества продовольственной базы может служить нут, характеризующийся высоким содержанием белка, отличными вкусовыми качествами и питательностью (Волковидр., 2023). Рентабельность нута составляет 65–85 %, что в 2–3 раза выше пшеницы. Нут обладает высокой засухоустойчивостью, его корневая система достигает глубины 1,5 м, что критично для засушливых регионов (Кубань, Ставрополье, Южный Урал). Данная особенность позволяет экономить средства на орошении. У нута короткий вегетативный период, что позволяет осуществлять двойной севооборот. Нетребователен к почвам и не нуждается в специальной технике. Для посева нута можно использовать зерновые или пропашные сеялки.

Качество нута является одним из параметров, влияющих на его стоимость. Без осуществления контроля качества нута, например, белка, может существенно снизиться его стоимость. Нут является стратегическим экспортным продуктом с растущим спросом. Главными покупателями российского нута являются Турция и Пакистан.

Для оценки качества зерна нута, как и большинства других зерновых и зернобобовых культур, используются химические и механические методы (Донская и др., 2021), которые являются разрушающими, неэкологичными и зачастую дорогостоящими.

Среди других методов диагностики имеет место масс-спектрометрия высокого разреше-

ния (Di Francesco et al., 2024). Оптические методы используют анализ изображений. Систему компьютерного зрения, интегрированную с искусственными нейронными сетями, использовали для оценки качества нута по размеру, цвету и морфологии поверхности. С помощью системы были определены физические свойства (длина, ширина и объем) образцов нута, а также их цветовые характеристики и свойства поверхности (Çakmak and Boyacı, 2011). Разработана модель для прогнозирования двух показателей урожайности нута: массы тысячи семян и количества семян на одно растение (Bankin et al., 2024).

Для определения изменений в качестве нута во время хранения была оценена возможность применения гиперспектральной визуализации (Indore et al., 2024). В качестве методов многомерного анализа данных для гиперспектральной съемки были использованы анализ главных компонент и дискриминантный анализ методом частичных наименьших квадратов.

Приоритетным направлением научно-технологического развития агропромышленного комплекса должен стать переход к передовым цифровым, интеллектуальным технологиям, роботизированным системам (Ценч, 2022). Одним из перспективных оптических методов для создания таких технологий является фотolumинесцентная спектроскопия. Метод не требует высококачественной изображательной оптики и необходимого для нее дорогостоящего оборудования, а при однократном измерении могут быть проанализированы свойства большого количества семян. Ранее фотolumинесцентные свойства были использованы авторами для анализа всхожести, влажности и степени заражения зерна и семян.

Целью данного исследования является анализ оптических фотolumинесцентных свойств нута для обоснования выбора информативных спектральных параметров при создании метода его диагностики.

Материалы и методы исследований. В качестве объекта был использован сорт среднеспелого нута Память. Семена средние, округлой формы, светло-бурые. Данный сорт интересен сравнительно высоким содержанием белка (в среднем более 24 %). Измеряли спектральные люминесцентные свойства зерна урожая 2024, 2019 и 2017 годов, хранившегося в одинаковых условиях. Эксперименты проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2025 году. Параметры семян, полученные на приборе FOSS NIRS DS 2500 (Дания), а также лабораторная всхожесть представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры воздушно-сухого нута
Table 1. Parameters of air-dried chickpeas

Год урожая	Белок, %	Влага, %	Жир, %	Зола, %	Крахмал, %	Всхожесть, %
2017	28,5 ± 0,8	8,3 ± 0,7	9,3 ± 1,5	6,5 ± 0,1	7,7 ± 0,5	88 ± 3
2019	25,1 ± 0,3	8,5 ± 0,1	8,5 ± 0,7	6,4 ± 0,1	7,7 ± 0,3	93 ± 2
2024	20,1 ± 2,3	7,8 ± 0,4	5,1 ± 1,6	6,5 ± 0,2	7,4 ± 0,6	96 ± 2

У семян более длительных сроков хранения более высокое содержание белка и жиров. Содержание влаги, золы и крахмала практически одинаково.

Спектральные характеристики возбуждения и фотолюминесцентного излучения измеряли на дифракционном спектрофлуориметре «СМ2203» (Белоруссия). Вначале измеряли спектры поглощения $\eta(\lambda)$ при синхронном сканировании монохроматорами в диапазоне спектра 230–730 нм для нахождения максимумов возбуждения. Затем измеряли спектры люминесценции $\phi(\lambda)$ при возбуждении на длинах волн максимального поглощения $\lambda_{\text{в}}$. Для семян каждого года урожая измерено по 30 воздушно-сухих семян в десятикратной повторности.

Интегральную поглощающую способность H в диапазоне спектра $\lambda_1 - \lambda_2$ определяли по формуле

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

Интегральную излучательную способность – поток фотолюминесценции Φ в диапазоне спектра $\lambda_3 - \lambda_4$ определяли по формуле

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

Статистическую обработку полученных результатов проводили по общепринятым формулам. Доверительные интервалы рассчитаны для надежности 0,95.

Результаты и их обсуждение. Возбуждение излучением воздушно-сухих семян нута (рис. 1) происходит в диапазоне спектра примерно 250–550 нм.

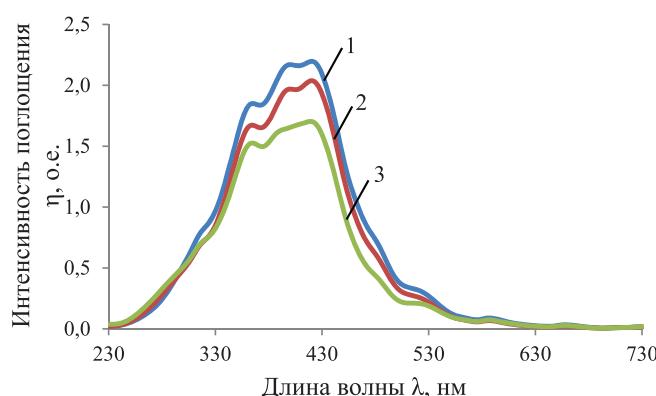


Рис. 1. Спектры возбуждения нута различных годов урожая: 1 – 2017-го, 2 – 2019-го, 3 – 2024-го
Fig. 1. Excitation spectra of chickpeas harvested in different years: 1 – 2017, 2 – 2019, 3 – 2024

Для семян всех лет урожая (сроков хранения) общий вид зависимостей $\eta(\lambda)$ является схожим. Имеется суперпозиция основных максимумов 362 и 424 нм, ранее отмеченных для большинства зерновых и зернобобовых семян (Беляков, 2024). Для семян сроков хранения с 2017 и 2019 гг. выделяется максимум на 390 нм. Более длинноволновые максими-

мы – 485, 526 и 585 нм – практически не отмечаются на общем фоне.

Рассчитаны интегральные поглощающие способности H (в относительных единицах) как во всем исследуемом диапазоне (230–730 нм), так и в области отдельных максимумов (табл. 2).

Таблица 2. Интегральные параметры спектров возбуждения нута
Table 2. Integral parameters of chickpea excitation spectra

Год урожая	H, о. е. (для спектрального диапазона, нм)					
	230–340	340–370	370–500	500–562	562–730	230–730
2017	45 ± 3	50 ± 2	201 ± 4	15 ± 1	6 ± 1	318 ± 8
2019	42 ± 3	45 ± 3	181 ± 8	12 ± 1	5 ± 1	286 ± 13
2024	44 ± 4	41 ± 2	150 ± 6	10 ± 1	5 ± 1	251 ± 10

Во всем диапазоне с увеличением сроков хранения увеличивается интеграль-

ная поглощающая способность, причем без перекрытия доверительных интервалов.

Вместе с тем, в коротковолновом диапазоне (230–340 нм) различий не заметно, а в диапазоне 340–370 нм – незначительно. То же самое и в длинноволновых диапазонах 500–562 нм и 562–730 нм. Наибольшее различие наблюдается в средневолновом диапазоне возбуждения 370–500 нм, где имеется статистически достоверное различие в 1,11–1,34 раза между образцами семян разного года урожая.

Таким образом, наиболее эффективное возбуждение происходит в средневолновом спектральном диапазоне. Поэтому в дальнейшем будем использовать для возбуждения длины волн максимумов $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм и $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм. Спектральные характеристики фотолюминесценции $\phi(\lambda)$ при возбуждении $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм (рис. 2) расположены в основном в диапазоне 410–600 нм.

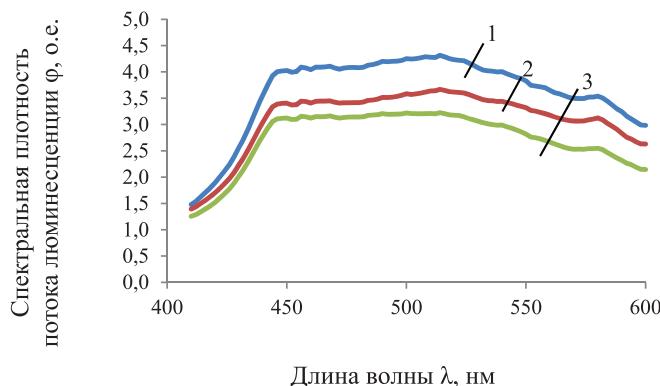


Рис. 2. Спектры люминесценции нута при $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм различных годов урожая:
1 – 2017-го, 2 – 2019-го, 3 – 2024-го
Fig. 2. Luminescence spectra of chickpeas at $\lambda_{\text{в}} = 362$ nm harvested in different years:
1 – 2017, 2 – 2019, 3 – 2024

Максимум спектра не выражен четко и находится на длинах волн примерно 440–510 нм. Как и для спектров возбуждения, наблюдается сходство характеристик и их зависимость от сроков хранения: при их увеличении спектральные характеристики смещаются вверх.

При возбуждении $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм также кривые имеют схожий вид и смещаются вверх при уве-

личении срока хранения (рис. 3). Отличием является большая величина спектральной плотности потока ϕ : до 6,2 о. е. при $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм против 4,3 о. е. при $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм. Максимум спектра находится примерно в диапазоне 520–540 нм.

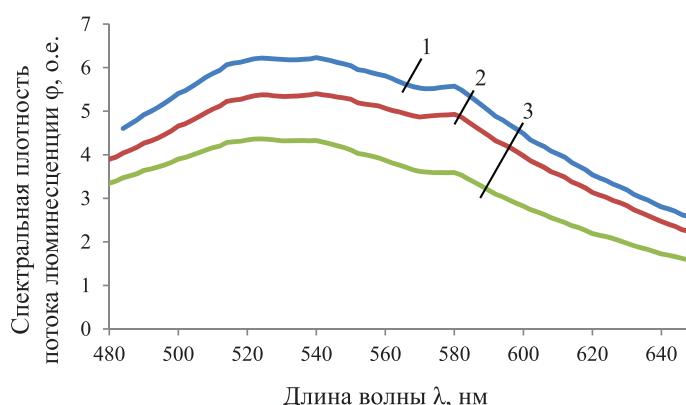


Рис. 3. Спектры люминесценции нута при $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм различных годов урожая:
1 – 2017-го, 2 – 2019-го, 3 – 2024-го
Fig. 3. Luminescence spectra of chickpeas at $\lambda_{\text{в}} = 424$ nm harvested in different years:
1 – 2017, 2 – 2019, 3 – 2024

Для лучшей количественной оценки рассчитаны интегральные параметры спектров – потоки фотолюминесценции $\Phi\lambda$ (табл. 3) во всем спектральном диапазоне регистра-

ции. Относительная погрешность определения потоков до 4,5 % при $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм и до 3,8 % при $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм. Доверительные интервалы не пересекаются.

Таблица 3. Интегральные потоки фотолюминесценции нута
Table 3. Integral photoluminescence fluxes of chickpeas

Год урожая	Ф362, о. е.	Ф424, о. е.
2017	693 ± 18	865 ± 23
2019	595 ± 27	756 ± 29
2024	523 ± 21	582 ± 22

Видна статистически достоверная зависимость потоков от времени и содержания белков и жиров. Вместе с тем, при $\lambda_b = 362$ нм с увеличением сроков хранения поток увеличивается сильнее: с 2024 до 2019 г. в 1,13 раза и с 2019 по 2017 г. – в 1,17 раза. Для возбуждения $\lambda_b = 424$ нм соответствующие показатели составляют 1,30 и 1,14 раза.

С биофизической точки зрения лучшая люминесцентная способность зерна нута может быть объяснена либо снижением способности удерживать влагу при старении, либо большим содержанием связанных с белками и жирами люминофоров (Беляков, 2024). Данные таблицы 1 свидетельствуют о втором варианте возможного объяснения полученных результатов, так как содержание белка выше у семян 2019 и 2017 гг. урожая, в то время как содержание влажности у всех семян примерно одинаково в пределах доверительного интервала.

При выборе длины волны возбуждения следует учитывать максимальный уровень фотосигнала (пропорциональный $\Phi\lambda$), погрешность определения потока и уровень увеличения потока для разных значений белка и жира. По всем данным показателям наилучшей является длина волны возбуждения 424 нм, при использовании которой отмечается максимальный уровень потока при наименьшей погрешности и наибольшее увеличение потока

в процессе хранения (на 48,6 %) по сравнению с $\lambda_b = 362$ нм (на 32,5 %). При использовании длины волны возбуждения 424 нм регистрировать люминесцентное излучение необходимо в диапазоне спектра 480–650 нм.

Полученные результаты будут положены в основу фотолюминесцентного метода контроля параметров нута в процессе длительного хранения.

Выводы. Спектральные характеристики возбуждения для всех исследованных образцов нута имеют максимумы на длинах волн 362 и 424 нм. В процессе хранения нута меняются его люминесцентные свойства: возрастают поглощательная и излучательная способности. Потоки фотолюминесценции увеличиваются при увеличении времени хранения на 48,6 % для $\lambda_b = 424$ нм и на 32,5 % – для $\lambda_b = 362$ нм. Погрешности определения потоков не превышают 3,8 и 4,5 % соответственно. По максимальному уровню фотосигнала, наибольшей чувствительности и наименьшей относительной погрешности наилучшим вариантом для фотолюминесцентной диагностики нута в процессе хранения является использование длины волны возбуждения 424 нм с диапазоном регистрации 480–650 нм.

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств Государственного задания FGUN-2025-0007.

Библиографический список

1. Беляков М.В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений // Агрофизика. 2024. № 4. С. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2024.04.09>
2. Волков Д.П., Башинская О.С., Зайцев С.А., Левкина А.Ю., Бабушкин Д.Д., Бычкова В.В., Калинин Ю.А. Технологический потенциал зернобобовых культур // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. 2023. № 3(57). С. 1–13. DOI: 10.51419/202133305
3. Донская М.В., Бобков С.В., Костикова Н.О. Оценка качества зерна различных сортобразцов нута // Зернобобовые и крупынные культуры. 2021. № 1(37). С. 30–36. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-1-30-36
4. Исаков Н., Айбек У.У. Проблемы хранения зерна и семян // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скребнико. 2023. № 1(64). С. 35–42.
5. Сазонова И.А., Бычкова В.В., Ерохина А.В., Молчанов А.В., Зайцев С.А. Потенциал зернобобовых культур как высокобелкового компонента в кормопроизводстве // Аграрный научный журнал. 2024. № 8. С. 103–107. DOI: 10.28983/asj.y2024i8pp103-107
6. Ценч Ю.С. Научнотехнический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. № 2(16). С. 4–13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13
7. Bankin M., Tykyrin Ya., Duk M., Samsonova M., Kozlov K. Modeling Chickpea Productivity with Artificial Image Objects and Convolutional Neural Network // Plants. 2024. Vol. 13, № 17. P. 2444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13172444>
8. Cakmak Y.S., Boyaci I.H. Quality evaluation of chickpeas using an artificial neural network integrated computer vision system // International Journal of Food Science and Technology. 2011. Vol. 46, Iss. 1. P. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02482.x>
9. Di Francesco A., De Santis M.A., Lanzoni A., Pittala M.G.G., Saletti R., Flagella Z., Cunsolo V. Mass Spectrometry Characterization of the SDS-PAGE Protein Profile of Legumins and Vicilins from Chickpea Seed // Foods. 2024. Vol. 13, № 6. P. 887. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13060887>
10. Indore N.S., Chaudhry M., Jayas D.S., Paliwal J., Karunakaran Ch. Non-Destructive Assessment of Microstructural Changes in Kabuli Chickpeas during Storage // Foods. 2024. Vol. 13, № 3. P. 433. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13030433>

References

1. Belyakov M.V. Opticheskie lyuminestsentnye svoistva semyan sel'skokhozyaistvennykh rastenii [Optical luminescent properties of agricultural seeds] // Agrofizika. 2024. № 4. S. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2024.04.09>
2. Volkov D.P., Bashinskaya O.S., Zajcev S.A., Lyovkina A.Y., Babushkin D.D., Bychkova V.V., Kalinin Y.A. Tekhnologicheskij potencial zernobobovyh kul'tur [Technological potential of legumes] // AgroEkoInfo: Elektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal. 2023. № 3(57). C. 1–13. DOI: 10.51419/202133305
3. Donskaya M.V., Bobkov S.V., Kostikova N.O. Otsenka kachestva zerna razlichnykh sortoobraztsov nuta [Estimation of grain quality of various chickpea varieties] // Zernobobovye i krupyanye kul'tury. 2021. № 1(37). S. 30–36. DOI: 10.24412/2309-348X-2021-1-30-36
4. Isakov N., Ajbek U.U. Problemy khraneniya zerna semyan [Grain and seed storage issues]// Vestnik Kyrgyzskogo nacional'nogo agrarnogo universiteta im. K.I. Skryabina. 2023. № 1(64). S. 35–42
5. Sazonova I.A., Bychkova V.V., Erohina A.V., Molchanov A.V., Zajcev S.A. Potencial zernobobovyh kul'tur kak vysokobelkovogo komponenta v kormoproizvodstve [Potential of legumes as a high-protein component in forage production] // Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2024. № 8. S. 103–107. DOI: 10.28983/asj.y2024i8pp103-107.
6. Cench Y.S. Nauchnotekhnicheskij potencial kak glavnij faktor razvitiya mekhanizacii sel'skogo hozyajstva [Scientific and technical potential as a key factor in the development of agricultural mechanization] // Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. 2022. № 2(16). S. 4–13. DOI: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13.
7. Bankin M., Tykyrin Ya., Duk M., Samsonova M., Kozlov K. Modeling Chickpea Productivity with Artificial Image Objects and Convolutional Neural Network // Plants. 2024. Vol. 13, № 17. P. 2444. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13172444>
8. Cakmak Y.S., Boyaci I.H. Quality evaluation of chickpeas using an artificial neural network integrated computer vision system // International Journal of Food Science and Technology. 2011. Vol. 46, Iss. 1. P. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02482.x>
9. Di Francesco A., De Santis M.A., Lanzoni A., Pittala M.G.G., Saletti R., Flagella Z., Cunsolo V. Mass Spectrometry Characterization of the SDS-PAGE Protein Profile of Legumins and Vicilins from Chickpea Seed // Foods. 2024. Vol. 13, № 6. P.887. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13060887>
10. Indore N.S., Chaudhry M., Jayas D.S., Paliwal J., Karunakaran Ch. Non-Destructive Assessment of Microstructural Changes in Kabuli Chickpeas during Storage // Foods. 2024. Vol. 13, № 3. P. 433. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13030433>

Поступила: 25.07.25; доработана после рецензирования: 02.07.25; принятa к публикации: 03.07.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за plagiat.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Московский М.Н., Беляков М.В. – концептуализация и ресурсное обеспечение исследования; Беляков М.В., Ефременков И.Ю. – подготовка и выполнение экспериментальных лабораторных работ и сбор данных, подготовка рукописи; Ефременков И.Ю. – визуализация, обработка и анализ данных и их интерпретация.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.