ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.33:581.192:543.421/.424
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-68-78

CC BY

Экспресс-оценка показателей питательной ценности семян *Vigna unguiculata* (L.) Walp. из коллекции ВИР с помощью БИК-спектроскопии

Т. В. Шеленга, А. А. Никифоров, М. О. Бурляева, И. Н. Перчук, В. С. Попов

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Марина Олеговна Бурляева, m.burlyaeva@vir.nw.ru

Актуальность. Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) – важнейшая пищевая и кормовая бобовая культура в странах с субтропическим и тропическим климатом. Семена вигны отличаются высокой питательной ценностью и содержат большое количество белка, крахмала, биологически активных соединений и железа, поэтому ее часто используют в питании в качестве заменителя мяса. Создание калибровочных моделей для экспресс-анализа основных показателей качества семян вигны на основе БИК-спектроскопии позволит ускорить оценку образцов по питательной ценности, снизить себестоимость анализа и сохранить селекционный материал.
Материалы и методы. Изучали семена 39 образцов вигны (*V. unguiculata*) с различной окраской семенной кожуры из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР). Показатели качества (белок, крахмал, общее содержание антоцианов) анализировали аналитическими методами, принятыми в ВИР: содержание белка – методом Кьельдаля, крахмала – методом Эверса, антоцианы – спектрофотометрическим методом. Калибровочные модели рассчитывали с помощью системы обработки данных OPUS к ИК-анализатору MATRIX-I (Bruker Optics, Германия).
Результаты и заключение. Использование разработанных калибровочных моделей для определения содержания белка, крахмала и антоцианов в семенах делает возможным массовый анализ образцов вигны с высокой точностью. Это позволит более точно и быстро подбирать исходный материал для селекции сортов с высокими показателями качества семян.

Ключевые слова: вигна, калибровочная модель, белок, крахмал, антоцианы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Шеленга Т.В., Никифоров А.А., Бурляева М.О., Перчук И.Н., Попов В.С. Экспресс-оценка показателей питательной ценности семян *Vigna unguiculata* (L.) Walp. из коллекции ВИР с помощью БИК-спектроскопии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(2):68-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-68-78

© Шеленга Т.В., Никифоров А.А., Бурляева М.О., Перчук И.Н., Попов В.С., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-68-78

Rapid assessment of nutritional value indicators in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seed accessions from the VIR collection using NIR spectroscopy

Tatiana V. Shelenga, Artur A. Nikiforov, Marina O. Burlyaeva, Irina N. Perchuk, Vitaliy S. Popov

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Marina O. Burlyaeva, m.burlyaeva@vir.nw.ru

Background. Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp. is an important food and feed legume crop in countries with subtropical and tropical climates. Cowpea seeds have high nutritional value and contain large amounts of protein, starch, bioactive compounds, and iron, so they are often used in nutrition as a meat substitute and included in various diets. The development of calibration models for a rapid analysis of the main quality indicators in cowpea seeds based on NIR (near-infrared) spectroscopy will speed up the evaluation of accessions for nutritional value, reduce the cost of analysis, and help to preserve valuable breeding material.
Materials and methods. Seeds of 39 cowpea (*V. unguiculata*) accessions with different seed coat colors from the collection of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) were analyzed. Quality indicators (protein, starch, and total anthocyanin content) were studied using analytical techniques accepted at VIR: the Kjeldahl method for protein content, the Evers method for starch, and spectrophotometry for total anthocyanins. Calibration models were calculated using the OPUS software developed for the MATRIX-I IR analyzer (Bruker Optics, Germany).
Results and conclusion. The use of the developed calibration models for assessing the protein, total anthocyanin and starch content in cowpea seeds makes it possible to perform their mass analysis with high precision. This will accelerate the selection of source material for breeding cultivars with high seed quality indicators and make it more accurate.

Keywords: cowpea, calibration model, protein, starch, anthocyanins

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0002 “Identifying possibilities in the genetic diversity of leguminous crops to optimize their breeding and diversify uses in various sectors of the national economy”.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shelenga T.V., Nikiforov A.A., Burlyaeva M.O., Perchuk I.N., Popov V.S. Rapid assessment of nutritional value indicators in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seed accessions from the VIR collection using NIR spectroscopy. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(2):68-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-68-78

Введение

Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) – важнейшая пищевая и кормовая бобовая культура в странах с субтропическим и тропическим климатом: в Африке, Азии, Северной и Южной Америке (Timko at al., 2007). По площади возделывания среди зерновых бобовых культур она занимает третье место в мире, уступая первенство только сое и фасоли (https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL). В Африке, Азии, на островах Карибского бассейна и на Гаити она является основной продовольственной культурой. С XVII века сорта вигны группы «Black eye» выращивают в Америке, где они составляют неотъемлемый элемент кухни жителей американского Юга. В России, несмотря на более чем столетнюю историю выращивания вигны в южных регионах страны (Pavlova, 1937), ее культивируют только в небольших фермерских хозяйствах и на приусадебных участках. В селекционных учреждениях только относительно недавно возник интерес к ней, особенно к образцам овощного направления использования. В результате вывели новые сорта, появились публикации по ее изучению на опытных полях в Нижнем Поволжье, в Прикаспийской низменности, на Северном Кавказе и на юге Дальнего Востока (Shuaibova et al., 2021; Burlyaeva et al., 2021).

Вигна – многофункциональная культура, обеспечивающая питанием человека и животных, улучшающая плодородие почвы, отличающаяся устойчивостью к засухе, жаре, затоплению и нетребовательностью к плодородию почвы. Достаточно часто в научной литературе пишут о вигне как о лекарственном растении, изданы статьи, посвященные изучению антиоксидантных, антиканцерогенных, антибактериальных свойств пептидов, фенольных соединений, фитостеролов и других веществ, содержащихся в семенах (Awika et al., 2017). В ряде публикаций описано применение *V. unguiculata* в профилактике и лечении некоторых болезней, связанных с обменом веществ, с сердечно-сосудистой и нервной системами, с онкологическими и дегенеративными заболеваниями (Zia-Ul-Haq et al., 2013).

Семена *V. unguiculata* характеризуются высоким содержанием белков (до 35,0%), углеводов (до 56,0%), микро- и макроминералов, низким содержанием липидов и наличием биологически активных соединений (Orita et al., 2019; Tsamo et al., 2019; Gonçalves et al., 2020; Razgonova et al., 2022). Благодаря такому составу культура стала широко известна как источник здорового диетического и функционального питания (Belane, Dakora, 2012; Shevkani et al., 2015). Наибольшее количество фенолсодержащих соединений, включая антоцианы, характерно для семян с темной оболочкой (Ha et al., 2010; Chen at al., 2017; Tsamo et al., 2019). Антоцианы обладают антиоксидантными, противовоспалительными, антиканцерогенными, антибактериальными и другими свойствами, полезными для здоровья (Khang et al., 2016; Šibul et al., 2016; Orita et al., 2019; Hernández-Ruiz et al., 2025). В связи с этим сорта с окрашенными семенами имеют особую диетическую ценность. Для создания новых улучшенных сортов *V. unguiculata* необходима как можно более полная информация о биохимическом составе семян различных генотипов вида. В состав коллекции генетических ресурсов вигны ВИР входят образцы разного происхождения, овощного и зернового направления использования, включая староместные сорта, собранные сотрудниками института в центре происхождения культуры в начале и середине XX века. Семенная кожура коллекционных образцов вигны имеет окраску от белой, бежевой, пятнистой до темно-вишневой и черной. Анализ биохимического состава семян этого вида позволит оценить разнообразие коллекции по основным показателям пищевого качества (по содержанию белка, крахмала, биологически активных веществ), что позволит выделить источники ценных свойств для их последующего использования в селекционных работах и расширении ассортимента продуктов здорового питания.

Для оптимизации изучения и ускорения процесса скрининга коллекционных образцов семян вигны необходимо использование спектроскопии в ближней области инфракрасного спектра (БИК). Метод основан на зависимости индивидуальных характеристик ИК-спектров от данных, полученных классическими аналитическими методами (Popov et al., 2024).

Калибровочные модели с подтвержденной достоверностью предназначены для экспресс-анализа образцов семян вигны из коллекции ВИР. Использование ИК-калибровочных моделей снижает себестоимость анализа, делает анализ безопасным для исследователя, позволяет сохранить семенной материал и получать результаты сразу по нескольким значимым параметрам с заданной повторяемостью.

Цель данной работы – разработка калибровочных моделей для БИК-анализатора типа MATRIX-I (Bruker, Германия) по основным показателям пищевой ценности семян вигны с различной окраской семенной кожуры (содержанию белка, крахмала, антоцианов) с использованием семенного модуля.

Материалы и методы

Материалом для изучения послужила выборка из 39 образцов семян *V. unguiculata* с различной окраской семенной кожуры, разного происхождения и лет репродукции из коллекции ВИР (табл. 1). Семена вырастили на Астраханской опытной станции – филиале ВИР. Станция располагается в самой засушливой зоне на европейской территории России – в зоне полупустынь в Астраханской области, характеризующейся сухим, резко континентальным климатом. Почвы на опытном поле светлокаштановые, слабозасоленные (с хлоридно-сульфатным типом засоления). Образцы выращивали в открытом грунте при орошении, без применения удобрений и пестицидов.

Биохимический анализ проводили в 2024 г. по методикам, описанным ранее (Chupakhina, Maslennikov, 2004; Popov et al., 2024). Содержание белка определяли по методу Кьельдаля на анализаторе белка VELP SCIENTIFICA UDK 159 (VELP, Италия); крахмала – поляриметрическим методом по Эверсу на поляриметре SAC-i (ATAGO, Япония); антоцианы – спектрофотометрическим методом на спектрофотометре LKB (Novaspec II, Великобритания). Для расчета белка по общему азоту использовали коэффициент 6,25, для перерасчета крахмала у бобовых культур – коэффициент 174,7. Для антоцианов применяли удельный показатель поглощения 1-процентного раствора цианид-3,5-диглюкозида в кювете с толщиной слоя 1 см ($A^{1\%}_{1см}$) – 453 (Butenko, Podgornaya, 2016; Ogorodnova, Timofeeva, 2020). Влажность (сухое вещество) семян определяли с помощью сушильного шкафа MEMMERT UNPlus160 (Германия) согласно ГОСТ 9404-88 (GOST 9404-88…, 2007).

Спектры образцов семян вигны регистрировали в трех повторностях (навеска для каждой повторности –

Таблица 1. **Список исследованных образцов семян *Vigna unguiculata* (L.) Walp. из коллекции ВИР**
Table 1. **List of the studied accessions of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. from the VIR collection and their seed colors**

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название сорта / Cultivar name	Происхождение / Origin	Окраска семян / Seed color
1352		Венесуэла	Белые с узким коричневым кольцом у рубчика Образец к-713
713		Америка	
1660		Франция	
1834		Вьетнам	
633050		Таиланд	
337		Мексика	Белые с черным пятном Образец к-1129
389		Куба	
1129		Иран	
1250		Португалия	
1311		Пакистан	
1372		Нигерия	
616		Индия	Бежевые Образец к-133
133		Россия, Ростов-на-Дону	
586		Абхазия	
608		Дания	
697		Таджикистан	
1027		Узбекистан	
1065		США	
1289		Бурунди	
1348		Мадагаскар	
1442		Нигерия	

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название сорта / Cultivar name	Происхождение / Origin	Окраска семян / Seed color
1403		Филиппины	Серо-бежевые с точечностью Образец к-1775
1775		Лаос	
1776		Лаос	
1780		Танзания	
1906		Бенин	
1907		Бенин	
2056	‘Лянчихе’	Россия, Приморский край	Красно-коричневые с продольными полосками Образец к-2056
2057	‘Самма Нова’	Россия, Астраханская обл.	
2058	‘Астраханская Красавица’	Россия, Астраханская обл.	
1173		Сомали	Вишневые Образец к-1195
1195		Сомали	
1249		США	
567		Индия	Черные Образец к-1738
1091		Казахстан	
1110	‘Mulgrave’	Австралия	
1355		Вьетнам	
1738	‘Сибирский Размер’	Россия, Новосибирск	
1912		Вьетнам	

20–30 г) в диапазоне 4500–10500 $см^{-1}$ с разрешением 16 $см^{-1}$ в соответствии с руководством к ИК-спектрометру MATRIX-I, используя семенной модуль (диаметр кюветы – 51 мм).

Калибровочные модели для изучения содержания белка, крахмала, суммы антоцианов в образцах семян вигны строили методом векторной нормализации с помощью программного обеспечения OPUS Software. Качество построенных калибровочных моделей определяли с помощью следующих показателей: R^2 (коэффициент детерминации); RMSEPCV (степень дисперсии значений, предсказанных сконструированной моделью, вокруг линии регрессии при перекрестной валидации); RPD (остаточное отклонение прогноза для ранга); Bias (показатель смещения) (Olale et al., 2013; Clingensmith et al, 2018).

Разницу ΔX между стандартными химическими методами и ИК-показаниями определяли по формулам (GOST 32749..., 2019):

$$\Delta X_{абс.} = \frac{\Sigma|X_1 - X_2|}{n}$$

$$\Delta X_{отн.} = \frac{\Sigma(100|X_1 - X_2| \cdot 100 / X_1)}{n},$$

где $\Delta X_{абс.}$ – абсолютное расхождение значений, полученных с помощью калибровочных моделей и аналитическим путем; $\Delta X_{отн.}$ – относительное расхождение значений, полученных с помощью калибровочных моделей и аналитическим путем; X_1 – среднее для значений, полученных с помощью методов химического анализа; X_2 – среднее для значений, полученных с помощью модельных калибровочных кривых; n – число образцов, использованных для проверки калибровки.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием U-критерия Манна – Уитни в программе Statistica 7.0 (http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm).

Результаты и их обсуждение

При сканировании в трех повторностях 39 образцов семян вигны получено 117 спектров (рис. 1).

В ходе конструирования калибровочных моделей установлена зависимость содержания белка (рис. 2, a), крахмала (рис. 2, b), суммы антоцианов (рис. 2, c) в семенах *V. unguiculata* от индивидуальных спектральных характеристик соответствующих образцов (в % на сухое вещество). Диапазон показателей для разработки калибровочных моделей соответствовал 19,3–30,0% для белка, 43,7–56,1% для крахмала, 1,6–443,0 мг% для общего содержания антоцианов.

Значения, полученные аналитическим путем, на модели для определения белка размещены довольно равномерно вдоль калибровочной графика, для определения крахмала – в области средних и высоких значений, для определения антоцианов – в области низких значений показателя (см. рис. 2, a, b, c).

Коэффициент детерминации (R^2) устанавливает корреляцию между данными, полученными аналитическим путем, и данными, предсказанными уравнениями калибровки для каждого из анализируемых компонентов (белок, крахмал, антоцианы) (García-Sánchez et al., 2017). Вновь разработанные калибровочные модели считаются достоверными, если коэффициент детерминации (R^2) превышает 80. Среди полученных моделей вышеуказанным условиям соответствует только модель «Вигна. Общее содержание антоцианов», где R^2 равняется 91,85 (табл. 2). Однако, принимая во внимание работу C. M. Clingensmith et al. (2018), калибровки с R^2 более 50% могут считаться удовлетворительными, так как при их использовании хорошо различаются между собой образцы с низкими, средними и высокими значениями изучаемых параметров. Следовательно, рассматривать как отличную можно модель «Вигна. Общее содержание антоциа-

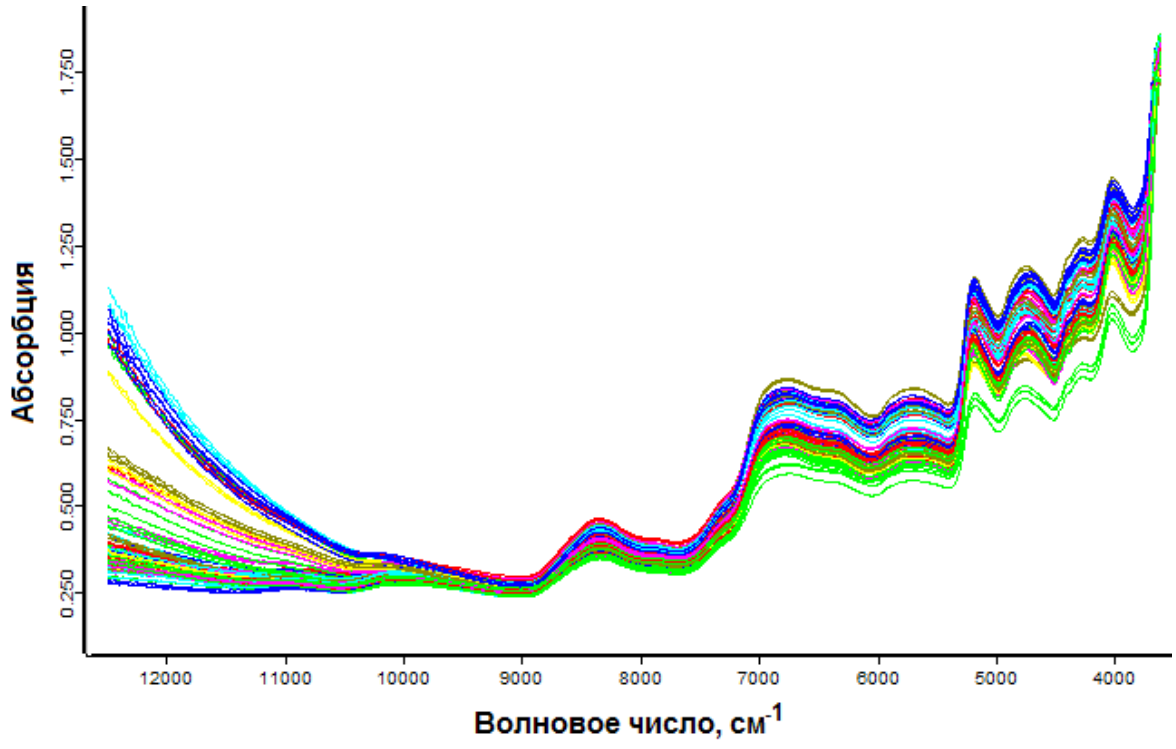
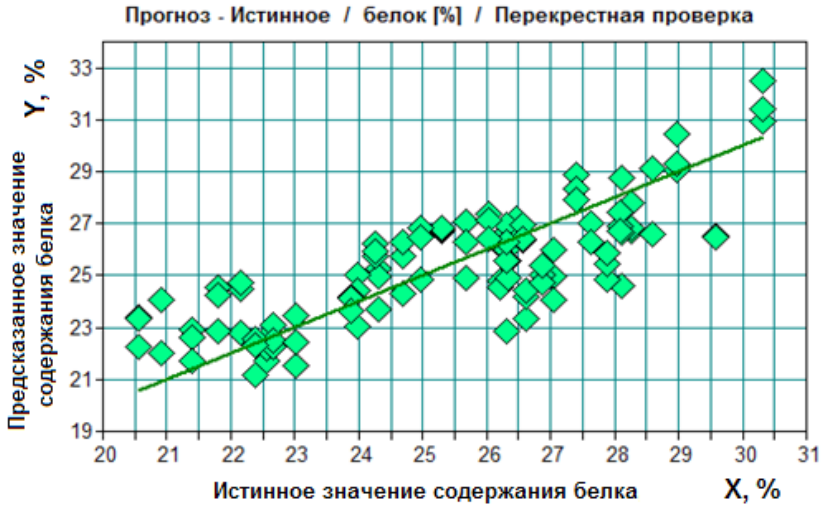
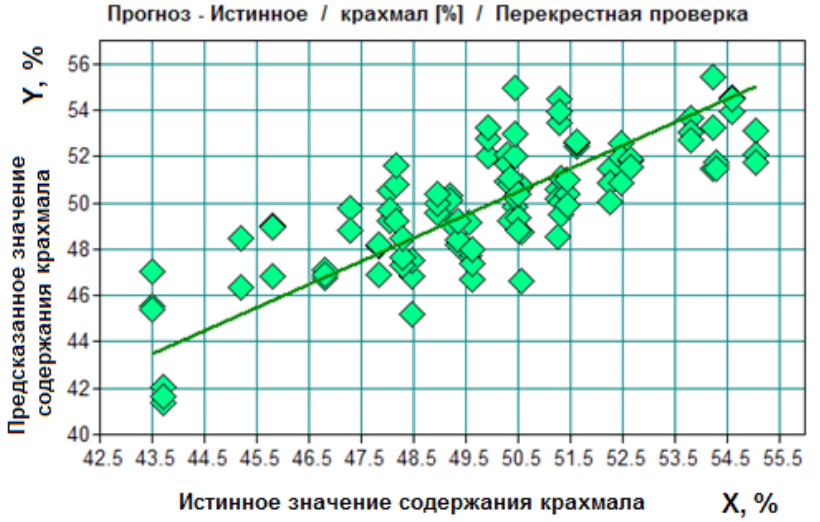


Рис. 1. ИК-спектры опытных образцов семян вигны

Fig. 1. Infrared spectra of the studied cowpea seed accessions



a)



b)

c)

Рис. 2. График предсказанных значений содержания белка (a), крахмала (b), общего содержания антоцианов (c) (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно калибровочной модели:
(a) – «Вигна. Белок», **(b)** – «Вигна. Крахмал», **(c)** – «Вигна. Общее содержание антоцианов» (зеленым отмечены учтенные, красным – неучтенные значения для образцов семян вигны при построении калибровочной кривой)

Fig. 2. Plot of predicted values for protein content (a), starch (b), and total anthocyanins (c) (Y axis) compared to true values (X axis) according to the calibration model: (a) – *Vigna. Protein*; **(b)** – *Vigna. Starch*; **(c) –** *Vigna. Total anthocyanin content* (green are the values taken into account, while red are the values not taken into account for cowpea seed accessions when constructing the calibration curve)

Таблица 2. Коэффициенты, описывающие качество калибровочных моделей
Table 2. Coefficients describing the quality of calibration models

КМ / К	Белок / Protein	Крахмал / Starch	Антоцианы / Anthocyanins
R^2	61,99	58,3	91,85
RMSEPCV	1,53	1,81	31,1
RPD	1,62	1,55	3,5
Bias	0,0384	0,0432	–0,786
ранги	15	15	6

Примечание: КМ – калибровочная модель; К – коэффициент; R^2 – коэффициент детерминации; RMSEPCV – степень дисперсии значений, предсказанных сконструированной моделью, вокруг линии регрессии при перекрестной валидации; RPD – остаточное отклонение прогноза для ранга; Bias – показатель смещения, или разница между средним значением измерения, полученным с помощью калибровочной модели, и значением, установленным аналитическими химическими методами

Note: КМ – calibration model; К – coefficient; R^2 – coefficient of determination; RMSEPCV – degree of dispersion for values predicted by the constructed model around the regression line during cross-validation; RPD – residual deviation of the forecast for the rank; Bias – the displacement indicator, or the difference between the mean value obtained with the calibration model and the value produced by analytical chemistry methods

нов», а удовлетворительными признать две модели: «Вигна. Белок» и «Вигна. Крахмал» (см. табл. 2).

RMSEPCV (степень дисперсии значений, предсказанных сконструированной моделью, вокруг линии регрессии при перекрестной валидации) характеризует точность разработанной модели и погрешность анализа (Olale, 2013); этот показатель не должен превышать 5%. Калибровка с RMSEPCV от 1 до 1,5 трактуется как отличная, от 2 до 3 – хорошая, 4 – удовлетворительная и 5 – плохая (García-Sánchez et al., 2017). Этому требованию удовлетворяют две модели (см. табл. 2), где значение RMSEPCV соответствует низкой погрешности при проведении анализа с использованием моделей «Вигна. Белок» и «Вигна. Крахмал».

Остаточное отклонение прогноза для ранга, или RPD, характеризует «предсказательную» способность, или адекватность калибровочных моделей (Olale, 2013). Модель считается отличной, если ее RPD превышает 4, хорошей, если RPD находиться в диапазоне от 3 до 4, достаточно хорошей – от 2,25 до 3 и приемлемой – от 1,75 до 2,25 (García-Sánchez et al., 2017; Saha et al., 2017). Согласно данному требованию модель «Вигна. Общее содержание антоцианов» считается отличной, «Вигна. Белок» и «Вигна. Крахмал» – стандартными.

Биохимические показатели и спектральные данные формируют матрицу для последующего построения калибровочной модели. Их соотношения сводятся к факторам, называемым «рангом». Существует несколько комбинаций частотного диапазона и предварительной обработки спектральных данных сопоставимого качества, что выражается в количестве рангов. Число рангов, как правило, не должно превышать 20 (García-Sánchez et al., 2017). В этом случае модель считается более стабильной. В нашем случае все приведенные нами модели удовлетворяют данному требованию (см. табл. 2).

Показатель смещения (Bias) показывает степень отклонения результата, полученного с помощью калибровочной модели (прогнозируемого), от аналитического (истинного). В соответствии со значениями Bias, представленными в таблице 2, прогнозируемые значения, полученные при использовании сконструированных моделей, не будут иметь значительных отклонений от истинных значений.

Согласно значениям коэффициентов, характеризующих практическую пригодность разработанных новых калибровочных моделей, пригодными для использования можно считать модели «Вигна. Белок» и «Вигна. Крахмал». Модель «Вигна. Общее содержание антоцианов» нуждается в доработке.

Достоверность данных для калибровок с $R^2 > 80\%$ подтверждена с помощью контрольной выборки из 10 образцов семян вигны 2024 г. репродукции. Сверка данных представлена в таблицах 3 и 4.

Сравнительный анализ результатов определения содержания белка и крахмала в семенах, полученных двумя методами, на новых образцах вигны в проверочной партии не выявил существенных различий. Данные по содержанию антоцианов в семенах, полученные разными методами, были не идентичными, вследствие этого требуется дальнейшая доработка (совершенствование) калибровочной модели. Однако сравнение показателей содержания белка, крахмала и антоцианов в семенах, определенных химическим и ИК-методами с помощью U-критерия Манна – Уитни, достоверных различий между ними при $p < 0,05$ не выявило.

Разница между спектральными показаниями и стандартными химическими методами определения единичных значений составила для крахмала от –3,2 до 4,5%, для антоцианов от –59,8 до 76,3 мг%, для белка от –2,0 до 1,9%, в среднем составив 1,84%, 35,05 мг% и 1,22% соответственно (см. табл. 3, 4).

Относительная разница между химическими методами анализа семян и ИК-спектроскопией в среднем не превышает 5% для белка и крахмала и составляет более 600 мг% для антоцианов. В данном анализе наблюдались небольшие отклонения от предельно допустимых значений погрешности в параллельных измерениях стандартными методами по показателям крахмала и белка, что может быть устранено в дальнейшем путем расширения калибровок за счет новых данных, полученных при изучении других образцов вигны.

Исследования показали, что по количественному содержанию антоцианов семена вигны значительно различаются между собой, и особенно выделяются черные семена. Как видно из рисунка 2, с, при построении калибровочной модели антоцианов значения для

Таблица 3. **Сравнительный анализ семян вигны по определению содержания белка, антоцианов и крахмала химическими и ИК-методами**

Table 3. **Comparative analysis of cowpea seeds for the assessment of protein, total anthocyanin, and starch content using chemical and IR methods**

Химический метод / Chemical method			ИК-метод / IR method			Разница абсолютных значений / Absolute difference			Разница относительных значений / Relative difference		
К	А	Б	К	А	Б	К	А	Б	К	А	Б
50,3	7,9	26,3	51,5	10,9	24,4	–1,2	–3,0	1,9	2,5	37,3	7,4
55,1	6,1	24,0	54,5	29,1	26,0	0,6	–23,0	–2,0	1,1	380,7	8,3
48,6	3,2	27,9	48,1	8,3	27,9	0,6	–5,1	0,0	1,2	159,2	0,1
48,0	3,3	27,2	47,2	–21,8	25,5	0,8	25,1	1,7	1,6	770,4	6,4
43,7	340,7	28,3	41,8	254,3	26,8	1,9	86,5	1,5	4,4	25,4	5,2
43,8	371,8	27,4	46,9	322,7	28,0	–3,2	49,1	–0,6	7,2	13,2	2,2
51,6	354,4	22,7	51,0	368,7	23,3	0,6	–14,2	–0,6	1,2	4,0	2,6
50,1	1,8	26,2	45,6	61,6	27,1	4,5	–59,8	–0,9	9,0	3318,8	3,3
52,5	7,1	21,8	50,4	15,5	23,2	2,2	–8,4	–1,4	4,1	119,4	6,5
48,9	5,3	24,7	46,0	–71,0	23,1	2,8	76,3	1,6	5,8	1439,9	6,6

Примечание: Б – белок, %; А – антоцианы, мг%; К – крахмал, %

Note: Б – protein, %; А – anthocyanins, mg%; К – starch, %

Таблица 4. **Проверка ИК-калибровочной моделей «Вигна. Белок», «Вигна. Общее содержание антоцианов», «Вигна. Крахмал»**

Table 4. **Verification of the IR calibration models *Vigna. Protein*, *Vigna. Total anthocyanin content*, and *Vigna. Starch***

Показатель / Indicator	X_1 ± Sd	X_2 ± Sd	$\Delta X_{абс.}$ / $\Delta X_{abs.}$	$\Delta X_{отн.}$ / $\Delta X_{rel.}$
Белок,* %	25,66 ± 2,25	25,52 ± 1,92	1,22	4,86
Крахмал,* %	49,26 ± 3,57	48,31 ± 3,62	1,84	3,80
Антоцианы, мг%	110,16 ± 169,58	97,83 ± 156,21	35,05	626,82

Примечание: $\Delta X_{абс.}$ и $\Delta X_{abs.}$ – расхождение значений, полученных с помощью калибровочных моделей и аналитическим путем; X_1 – среднее значение данных, полученных с помощью методов химического анализа; X_2 – среднее значение данных, полученных с помощью модельных калибровочных кривых; Sd – стандартное отклонение; * – отмечены показатели, для которых значение ΔX не выходило за рамки технической погрешности прибора MATRIX-I (Bruker, Германия)

Note: $\Delta X_{абс.}$ and $\Delta X_{abs.}$ is the discrepancy between the values obtained through calibration models and analytically; X_1 is the mean of values obtained with biochemical analysis methods; X_2 is the mean of values obtained with model calibration curves; Sd is the standard deviation; * – the indicators for which the ΔX value did not exceed the technical error of the MATRIX-I device (Bruker, Germany)

образцов семян вигны распределены крайне неравномерно вдоль прямой, при этом четко выделяются две области – для образцов с высоким и низким содержанием антоцианов. Поэтому в дальнейшей работе представляется актуальным разработать две калибровочные модели, соответственно для черных и для светлых семян вигны, на большем количестве семенного материала.

Заключение

Калибровочные модели, полученные на ИК-анализаторе MATRIX-I (BRUKER, Германия) с помощью программного обеспечения OPUS LAB для измерения содержания белка, антоцианов и крахмала, позволяют проводить массовый скрининг образцов семян вигны из коллекции ВИР с высокой точностью и сохранить ценный селекционный материал. Это даст возможность оперативно определять показатели качества семян у разных генотипов и дифференцировать их по этим признакам для дальнейшего целенаправленного использования в селекции специализированных сортов, удовлетворяющих различные требования потребителей.

References / Литература

Awika J.M., Duodu K.G. Bioactive polyphenols and peptides in cowpea (*Vigna unguiculata*) and their health promoting properties: a review. *Journal of Functional Foods*. 2017;38:686-697. DOI: 10.1016/j.jff.2016.12.002

Belane A.K., Dakora F.D. Elevated concentrations of dietarily-important trace elements and macronutrients in edible leaves and grain of 27 cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) genotypes: implications for human nutrition and health. *Food and Nutrition Sciences*. 2012;3(3):377-386. DOI: 10.4236/fns.2012.33054

Burlyaeva M.O., Gurkina M.V., Miroshnichenko E.V. Application of multivariate analysis to identify relationships among useful agronomic characters of cowpea and differentiation of cultivars for vegetable and grain uses. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):36-47. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Мирошниченко Е.В. Применение многомерного анализа для выявления взаимосвязей хозяйственно ценных признаков вигны и дифференциации сортов по овощному и зерновому направлениям использования. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):36-47). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-36-47

Butenko L.I., Podgornaya Zh.V. Studies of the anthocyanin complex in berries that have undergone cryoprocessing (Issledovaniya antotsianovogo kompleksa yagod, proshedshikh krioobrabotku). *Advances in Current Natural Sciences*. 2016;(11):14-17. [in Russian] (Бутенко Л.И., Подгорная Ж.В. Исследования антоцианового комплекса ягод, прошедших криообработку. *Успехи современного естествознания*. 2016;(11):14-17).

Chen H.J., Ooi Y.S., Liu M.L., Chao Y.Y. Study on the growth traits in eighth-month beans (*Vigna unguiculata* L.). *International Journal of Advanced Scientific Research and Management*. 2017;2(4):10-17.

Chupakhina G.N., Maslennikov P.V. (comp.). Methods of vitamin analysis: a practicum (Metody analiza vitaminov. Praktikum). Kaliningrad: Kaliningrad State University; 2004. [in Russian] (Методы анализа витаминов: Практикум / сост. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Калининград: Калининградский государственный университет; 2004). DOI: 10.13140/2.1.1147.7449

Clingensmith C.M., Grunwald S., Wani S.P. Evaluation of calibration subsetting and new chemometric methods on the spectral prediction of key soil properties in a data-limited environment. *European Journal of Soil Science*. 2018:70(1):107-126. DOI: 10.1111/ejss.12753

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [accessed Dec. 14, 2024].

García-Sánchez F., Galvez-Sola L., Martínez-Nicolás J.J., Muelas-Domingo R., Nieves M. Using near-infrared spectroscopy in agricultural systems. In: K.G. Kyprianidis, J. Skvaril (eds). *Developments in Near-Infrared Spectroscopy*. Rijeka: InTechOpen; 2017. pub.1084734258. DOI: 10.5772/67236

Gonçalves F.V., Medici L.O., Fonseca M.P.S., Pimentel C., Gaziola A.S., Azevedo R.A. Protein, phytate and minerals in grains of commercial cowpea genotypes. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2020;92 Suppl 1:e20180484. DOI: 10.1590/0001-3765202020180484

GOST 32749-2014. Interstate standard. Oilseeds, oilcakes and oilmeals. Determination of moisture, oil, protein and fiber by Near-Infrared Reflectance. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 32749-2014. Межгосударственный стандарт. Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200111470 [дата обращения: 14.05.2024].

GOST 9404-88. Interstate standard. Flour and bran. Method of moisture content determination. Moscow: Standartinform; 2007. [in Russian] (ГОСТ 9404-88. Межгосударственный стандарт. Мука и отруби. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2007). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200022334 [дата обращения: 22.05.2024].

Ha T.J., Lee M.H., Jeong Y.N., Lee J.H., Han S.I., Park C.H. et al. Anthocyanins in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp. ssp. *unguiculata*]. *Food Science and Biotechnology*. 2010;19(3):821-826. DOI: 10.1007/s10068-010-0115-x

Hernández-Ruiz R.G., Olivares-Ochoa X.C., Salinas-Varela Y., Guajardo-Espinoza D., Roldán-Flores L.G., Rivera-Leon E.A. et al. Phenolic compounds and anthocyanins in legumes and their impact on inflammation, oxidative stress, and metabolism: comprehensive review. *Molecules*. 2025;30(1):174. DOI: 10.3390/molecules30010174

Khang D.T., Dung T.N., Elzaawely A.A., Xuan T.D. Phenolic profiles and antioxidant activity of germinated legumes. *Foods*. 2016;5(2):27. DOI: 10.3390/foods5020027

Ogorodnova U.A., Timofeeva O.A. Large practical course on plant physiology and biochemistry: a teaching aid (Bolshoy praktikum po fiziologii i biokhimii rasteniy: uchebno-metodicheskoye posobiye). Kazan: Kazan Federal University; 2020. [in Russian] (Огороднова У.А., Тимофеева О.А. Большой практикум по физиологии и биохимии растений: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский федеральный университет; 2020).

Olale K., Yenesew A., Jamnadass R., Sila A., Aynekulu E., Kuyah Sh. et al. Limitations to use of infrared spectroscopy for rapid determination of carbon-nitrogen and wood density for tropical species. *Advances in Analytical Chemistry*. 2013;3(3):21-28. DOI: 10.5923/j.aac.20130303.01

Orita A., Musou-Yahada A., Shoji T., Oki T., Ohta H. Comparison of anthocyanins, proanthocyanidin oligomers and antioxidant capacity between cowpea and grain legumes with colored seed coat. *Food Science and Technology Research*. 2019;25(2):287-294. DOI: 10.3136/fstr.25.287

Pavlova A.M. Cowpea (Vigna). In: *Flora of Cultivated Plants. Vol. 4. Grain Legumes.* Moscow; Leningrad; 1937. p.623-646. [in Russian] (Павлова А.М. Вигна. В кн.: *Культурная флора СССР. Т. 4. Зерновые бобовые.* Москва; Ленинград; 1937. С.623-646).

Popov V.S., Shelenga T.V., Blinova E.V., Khoreva V.I. Application of NIR spectroscopy to determine the basic biochemical parameters of black oat grain quality. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):31-41. [in Russian] (Попов В.С., Шеленга Т.В., Блинова Е.В., Хорева В.И. Применение БИК-спектроскопии для определения основных биохимических показателей качества у овса песчаного. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):31-41). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-o1

Razgonova M.P., Burlyaeva M.O., Zinchenko Y.N., Krylova E.A., Chunikhina O.A., Ivanova N.M. et al. Identification and spatial distribution of bioactive compounds in seeds *Vigna unguiculata* (L.) Walp. by laser microscopy and tandem mass spectrometry. *Plants (Basel)*. 2022;11(16):2147. DOI: 10.3390/plants11162147

Saha U., Endale D., Tillman P.G., Johnson W.C., Gaskin J., Sonon L. et al. Analysis of various quality attributes of sunflower and soybean plants by near infrared reflectance spectroscopy: development and validation calibration models. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2017;8(7):462-492. DOI: 10.4236/ajac.2017.87035

Shevkani K., Kaur A., Kumar S., Singh N. Cowpea protein isolates: Functional properties and application in gluten-

free rice muffins. *LWT – Food Science and Technology*. 2015;63(2):927-933. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.04.058

Shuaibova N.Sh., Khabibov A.D., Omarova P.A. Comparative analysis of the variable structure of *Vigna unguiculata* (L.) Warp. morphological features in the conditions of lowland Dagestan. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2020;57(1):128-137. [in Russian] (Шуайбова Н.Ш., Хабибов А.Д., Омарова П.А. Сравнительный анализ структуры изменчивости морфологических признаков сортообразцов *Vigna unguiculata* (L.) Warp. в условиях равнинного Дагестана. *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2020;57(1):128-137).

Šibul F., Orčić D., Vasić M., Anačkov G., Nađpal J., Savić A. et al. Phenolic profile, antioxidant and anti-inflammatory potential of herb and root extracts of seven selected legumes. *Industrial Crops and Products*. 2016;83:641-653. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.12.057

StatSoft. Electronic manual on statistics (Elektronny uchebnik po statistike): [website]. [in Russian] (StatSoft. Электронный учебник по статистике: [сайт]). URL: http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm [дата обращения: 06.05.2021]

Timko M.P., Ehlers J.D., Roberts P.A. Cowpea. In: C. Kole (ed.). *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants. Vol. 3. Pulses, Sugar and Tuber Crops*. Berlin; Heidelberg: Springer; 2007. p.49-67. DOI: 10.1007/978-3-540-34516-9_3

Tsamo A.T., Mohammed H., Mohammed M., Ndibewu P.P., Dakora F.D. Seed coat metabolite profiling of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) accessions from Ghana using. UPLC-PDA-QTOF-MS and chemometrics. *Natural Product Research*. 2019;34(8):1158-1162. DOI: 10.1080/14786419.2018.1548463

Zia-Ul-Haq M., Ahmad S., Amarowicz R., De Feo V. Antioxidant activity of the extracts of some cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) cultivars commonly consumed in Pakistan. *Molecules*. 2013;18(2):2005-2017. DOI: 10.3390/molecules18022005

Информация об авторах

Татьяна Васильевна Шеленга, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Артур Александрович Никифоров, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, artur.nikiforov.2000@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-2859-0797

Марина Олеговна Бурляева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, m.burlyaeva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3708-2594

Ирина Николаевна Перчук, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.perchuk@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-6568-5248

Виталий Сергеевич Попов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, v.popov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3274-7662

Information about the authors

Tatiana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Artur A. Nikiforov, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, artur.nikiforov.2000@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-2859-0797

Marina O. Burlyaeva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, m.burlyaeva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3708-2594

Irina N. Perchuk, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.perchuk@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-6568-5248

Vitaliy S. Popov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.popov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3274-7662

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 06.02.2025; принята к публикации 19.03.2025.
The article was submitted on 24.12.2024; approved after reviewing on 06.02.2025; accepted for publication on 19.03.2025.