

Научная статья

УДК 633.13:581.192:543.421/.424

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-01



Применение БИК-спектроскопии для определения основных биохимических показателей качества зерна у овса песчаного

В. С. Попов, Т. В. Шеленга, Е. В. Блинова, В. И. Хорева

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

Автор, ответственный за переписку: Виталий Сергеевич Попов, popovitaly@yandex.ru

Актуальность. Разработка градуировочных моделей для экспресс оценки основных биохимических показателей качества зерна голозерных и пленчатых форм овса песчаного *Avena strigosa* Schreb. с помощью спектроскопии ближнего инфракрасного отражения (БИК) является важной и актуальной задачей современности. Использование цельного зерна для анализа позволяет сохранить особо ценный селекционный материал, что очень важно для селекционеров. **Материалы и методы.** Зерно овса песчаного (50 образцов из коллекции ВИР) выращивали в 2014–2020 годах в различных агроэкологических условиях Российской Федерации. Для получения данных о химическом составе овса песчаного, необходимых для построения градуировочных моделей, в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР проведено определение показателей качества зерна химическими методами: белка/азота – по Кельдалю, масла – в экстракторе Сокслета в модификации С.В. Рушковского, крахмала – поляриметрическим методом по Эверсу, бета-глюканов – гравиметрическим методом. **Результаты.** Получены градуировочные модели для ИК-анализатора MATRIX-I фирмы Bruker (Германия) по определению белка, масла, крахмала и бета-глюканов в цельных зернах овса песчаного. На проверочной партии (20 образцов) оценивали достоверность построенных моделей. Показано, что модели для определения белка, крахмала и масла являлись достоверными, а модель по определению бета-глюканов нуждается в доработке. Установлено, что разница между спектральными показаниями и стандартными химическими методами единичных значений в среднем составила для белка 0,38 %, крахмала 0,57 % и масла 0,30 %, что не превышает предельно допустимых значений погрешности в параллельных измерениях. Относительная разница у исследуемых показателей в среднем не превышает 3-6 %. **Заключение.** Предлагаемый физический метод анализа зерна овса песчаного позволяет в экспресс режиме проводить предварительную оценку селекционного материала с высокой скоростью анализа. Из основных преимуществ метода можно отметить возможность сохранения ценного исходного материала, повышение эффективности труда, а также получение после сканирования образца данных сразу по нескольким показателям и с заданной повторяемостью.

Ключевые слова: зерновые культуры, овёс щетинистый, *Avena strigosa* Schreb., градуировочная модель, метод спектроскопии в ближней ИК-области, белок, крахмал, масло, бета-глюканы

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-00005, <https://rscf.ru/project/23-76-00005/>

Для цитирования: 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: 10.30901/2658-6266-2024-2-01

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Попов В.С., Шеленга Т.В., Блинова Е.В., Хорева В.И., 2024

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-ol

Application of NIR spectroscopy to determine the basic biochemical parameters of black oat grain quality

Vitaliy S. Popov, Tatiana V. Shelenga, Elena V. Blinova, Valentina I. Khoreva

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

Corresponding author: Vitaliy S. Popov, popovitaly@yandex.ru

Background. The purpose of this work was to develop calibration models for rapid assessment of the main biochemical parameters of grain quality of naked and covered black oat (*Avena strigosa* Schreb.) using near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy. The use of whole oat grains makes it possible to preserve breeding material of special value, which is very important for breeders. **Materials and methods.** Black oat grain from 50 accessions from the VIR collection was grown in 2014–2020 in various agro-ecological conditions of the Russian Federation. Chemical parameter values for constructing calibration models were determined in the Laboratory of Biochemistry and Molecular Biology of VIR using traditional methods, such as Kjeldahl for protein/nitrogen, Soxhlet extraction (modified by S.V. Rushkovsky) for oil, polarimetry according to Evers for starch, and gravimetry for beta-glucans. **Results.** The work resulted in the construction of calibration models for the determination of protein, oil, starch and beta-glucans in whole grains of black oat by a Bruker's MATRIX-I IR analyzer (Germany). A test batch of 20 accessions was used for assessing reliability of the constructed models. The models for determining protein, starch and oil were found to be reliable, while the model for determining beta-glucans needs improvements. It was found that the difference between the values obtained by spectroscopy and by standard chemical methods averaged 0.38 % for protein, 0.57 % for starch and 0.30 % for oil, which does not exceed the maximum permissible error of parallel measurements. The relative difference between the studied indicators does not exceed 3–6 % on an average. **Conclusion.** The proposed physical method for the analysis of black oat grain allows an express preliminary assessment of breeding material with a high speed of analysis. The main advantages of the method include the possibility of preserving valuable starting material, economizing on reagents, increasing labor efficiency, and obtaining data simultaneously on several parameters of the scanned sample with a specified repeatability.

Keywords: grain crops, *Avena strigosa* Schreb., calibration model, near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy, protein, starch, oil, beta-glucans

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-00005, <https://rscf.ru/project/23-76-00005/>

For citation: 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 Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-ol

Financial transparency: The authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employers.

© Popov V.S., Shelenga T.V., Blinova E.V., Khoreva V.I., 2024

Введение

Овес песчаный *Avena strigosa* Schreb., иначе называемый овсом щетинистым, представляет собой ценную кормовую культуру, имеет короткий вегетационный период, высокую продуктивность и пищевую ценность при высоком содержании белка (Sobczak et al., 2005; Macari et al., 2006; Paris et al., 2012). Раньше этот вид овса выращивали в основном в северной Шотландии для пищевых целей, а также для кормления животных на пастбищах и получения сена, но сейчас его выращивают в основном в Латинской Америке (Weibull et al., 2002). Несмотря на широкое распространение *A. strigosa*, долгое время не было изучено его разнообразие, однако овес песчаный имеет большой потенциал для поддержания биоразнообразия овса и программ селекции (Husson et al., 2012).

При изучении химического состава и изменений, происходящих в результате воздействия различных факторов среды при созревании и хранении зерна, используются различные лабораторные методы анализа. Одним из наиболее перспективных и информативных является метод спектроскопии ближнего инфракрасного отражения

(БИК-спектроскопии), который впервые был применен в зерновой промышленности в 1960-х годах (Hart, Norris, 1962).

Метод позволяет в экспресс-режиме проводить разнообразные биохимические исследования больших объемов коллекционного материала и в дальнейшем выделять образцы с наиболее перспективными свойствами для применения в пищевой и кормовой промышленности.

Целью работы является использование метода БИК-спектроскопии для определения основных биохимических показателей: содержание белка, крахмала, масла, бета-глюканов в зерне овса песчаного и построение соответствующих градуировочных моделей.

Материалы и методы

Для построения градуировочных моделей использовали различные по происхождению, месту и году репродукции разновидности голозерных (12) и пленчатых (38) образцов зерна овса песчаного *Avena strigosa* Schreb. из коллекции ВИР, всего 50 образцов (табл. 1).

Таблица 1. Образцы *A. strigosa* из коллекции ВИР для построения градуировочных моделей

Table 1. *A. strigosa* accessions from the VIR collection used for constructing calibration models

№/ No.	№ кат. ВИР/ VIR cat. No.	Происхождение/ Origin	Место*-год репродукции/ Place*-year of reproduction
1	14942	Германия	ЕОС-2014
2	13439	Венгрия	ЕОС-2015
3	1267	Германия	ЕОС-2018
4	2350	Тверская обл.	ЕОС-2018
5	12240	Германия	ЕОС-2019
6	13081	США	ЕОС-2019
7	13112	Великобритания	ЕОС-2019
8	13133	Бразилия	ЕОС-2019
9	5196	Испания	КОС-2014
10	5288	Португалия	КОС-2015
11	5195	Испания	КОС-2016
12	5194	Испания	КОС-2017
13	9890	Болгария	КОС-2017
14	14674	Турция	КОС-2017
15	5193	Испания	КОС-2019
16	5197	Испания	КОС-2020
17	5199	Испания	КОС-2020
18	5244	Португалия	КОС-2020
19	14675	Турция	КОС-2020
20	5278	Португалия	КОС-2021

№/ No.	№ кат. ВИР/ VIR cat. No.	Происхождение/ Origin	Место*-год репродукции/ Place*-year of reproduction
21	11153	Франция	КОС-2014
22	11912	Финляндия	МОВИР-2012
23	3063	Белоруссия	МОВИР-2014
24	4917	Псковская обл.	МОВИР-2014
25	4919	Псковская обл.	МОВИР-2014
26	4920	Псковская обл.	МОВИР-2014
27	4968	Великобритания	МОВИР-2014
28	5011	Псковская обл.	МОВИР-2015
29	4480	Великобритания	МОВИР-2016
30	4482	Великобритания	МОВИР-2016
31	15130	Великобритания	МОВИР-2016
32	4913	Новгородская обл.	МОВИР-2017
33	4914	Новгородская обл.	МОВИР-2017
34	5010	Ленинградская обл.	МОВИР-2017
35	6596	Вологодская обл.	МОВИР-2017
36	6600	Ленинградская обл.	МОВИР-2017
37	14562	Дания	МОВИР-2017
38	15024	Великобритания	МОВИР-2017
39	4481	Великобритания	МОВИР-2019
40	5009	Новгородская обл.	МОВИР-2019
41	4035	Великобритания	МОВИР-2019
42	14943	Великобритания	МОВИР-2019
43	12562	Норвегия	МОВИР-2020
44	14944	Нидерланды	МОВИР-2020
45	15128	Великобритания	МОВИР-2020
46	14439	Великобритания	П-2016
47	6586	Псковская обл.	П-2020
48	6591	Псковская обл.	П-2020
49	9286	Украина	П-2020
50	14525	Франция	П-2022

*МОВИР – Московское отделение ВИР (Михнево); КОС – Кубанская опытная станция; ЕОС – Екатеринбургская опытная станция; П – Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР/ МОВИР – Moscow VIR Department (Mikhnevo); КОС – Kuban Experiment Station; ЕОС – Ekaterininskaya Experiment Station; П – Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR

Агробиологические характеристики (посев, наблюдения и сбор урожая) овса проводили в соответствии с методическими рекомендациями (Loskutov et al., 2012). Климатические условия различались в разных местах выращивания образцов: они были прохладно-влажными в Ленинградской области, умеренными в Московском отделении и на Екатеринбургской опытной станции, засушливо-жаркими на Кубанской опытной станции в Краснодарском крае.

Перед проведением биохимического анализа зерно измельчали до размера частиц 10 мкм с помощью лабораторной дисковой мельницы CM 290 Cemotec (FOSS, Швеция). Полученную муку помещали в непрозрачные металлические боксы для защиты от света и предотвра-

щения окисления масла. Исследования проводили согласно методикам, принятым в ВИР (Ermakov et al., 1987).

Содержание **белка** определяли по методу Кьельдаля, на приборе UDK 159 Velp Scientifica (Италия). Его рассчитывали по содержанию азота с использованием коэффициента 5,7; содержание **масла** определяли по массе сухого обезжиренного остатка в аппарате Сокслета, применяя в качестве растворителя петролейный эфир (40-70°C). Содержание **крахмала** определяли по Эверсу с помощью автоматического поляриметра SAC-i (ATAGO, Япония), используя коэффициент перерасчёта 1,3; содержание **бета-глюканов** – гравиметрическим методом (Popov et al., 2021); **сухого вещества в зерне** – воздушно-тепловым методом по ГОСТ 9404-88 (GOST 9404-88,

2007).

Спектры образцов овса песчаного регистрировали с помощью «Фурье-спектрометра MATRIX-I» фирмы «Bruker Optik GmbH» (Германия) в трех повторностях (навеска 25-30 г) в диапазоне $0,780 \div 2,500$ мкм

($12800 \div 4000$ см⁻¹ с разрешением 16 см⁻¹) в соответствии с руководством к спектрометру MATRIX-I, используя зерновой модуль (кювета диаметром 51 мм). Получено 150 спектров для 50 образцов овса (рис. 1).

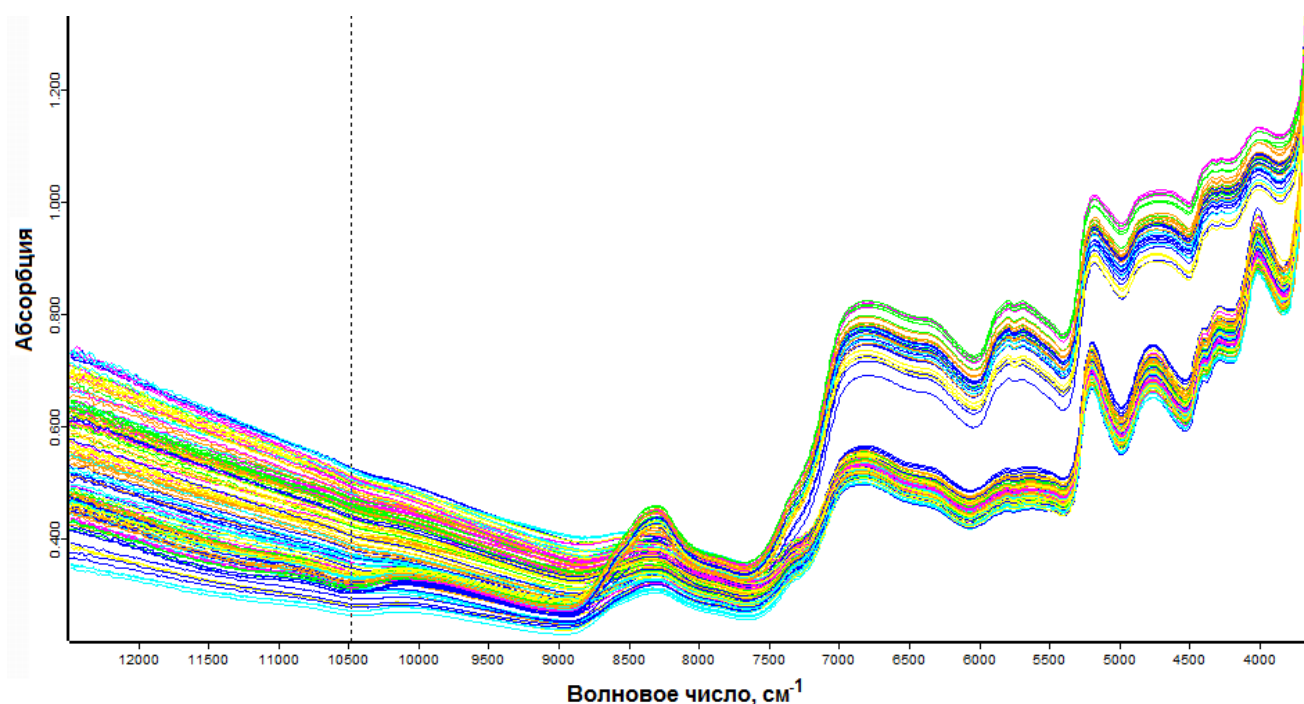


Рис. 1. Инфракрасные спектры исследуемых образцов овса песчаного

Fig. 1. Infrared spectra of the studied black oat accessions

Не существует фиксированного числа или практического правила для определения точного количества образцов, которые будут включены в градуировочную модель. Для технико-экономического обоснования и первоначальной градуировки следует взять как минимум 20 проб, но для более надежных калибровок может потребоваться несколько сотен образцов (Williams, 2001). Образцы для моделей исследовали при их фактической влажности.

После сопоставления данных, полученных химическими методами, и их спектров, а также последующей математической обработки с помощью программного обеспечения спектрометра OPUS Software, были построены градуировочные модели по определению содержания белка, масла, крахмала и бета-глюканов. Выполняя тест качества работы (PQ) и тест качества функционирования (OQ) для корректной работы прибора также применяли приложение OPUS Validation Program, необходимое для обеспечения автоматической проверки спектрометра. Значение коэффициента корреляции моделей составляло не менее 0,75. Статистическую обработку полученных данных производили с использованием пакета программ Microsoft Office 2016.

Результаты и обсуждение

Ранее в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР были проведены исследования по освоению инфракрасного (ИК) анализатора MATRIX-I и разработаны градуировочные модели для определения различных макропоказателей для посевного овса, ячменя и некоторых других культур (Khoreva et al., 2022; Popov et al., 2024).

По своей структуре, форме, цвету овес песчаный существенно отличается от овса посевного, поэтому для его дальнейшего изучения и скрининговых исследований необходимо построение отдельных градуировок для БИК-спектроскопии.

Для построения устойчивых градуировочных моделей отобрано 50 образцов с максимально возможной изменчивостью процентного содержания (%): белка от 11,92 до 18,06 для пленчатых форм и от 16,06 до 21,30 для голозерных форм; крахмала – в пределах 39,31-48,34 и 52,83-56,90; масла – 3,78-5,78 и 4,63-8,10; бета-глюканов – 2,01-4,69 и 2,50-5,75, соответственно.

Обработка результатов химического анализа требует применения математики, статистики и вычислительных устройств, что относится к области хеометрики. Без вычислительных возможностей и многомерных методов применение БИК-спектроскопии было бы невозможно. На этапе разработки моделей с помощью программного обеспечения OPUS, партию образцов, выбранных для построения калибровочных моделей, разделили поровну – калибровочную и тестовую часть (по 75 образцов). В ходе построения модели просчитывали, с использованием разных алгоритмов, до 150 спектров по калибровочным образцам с проверкой их на тестовых образцах. В результате анализа спектральных данных построены калибровочные модели Strigosa_Protein, Strigosa_Starch, Strigosa_Oil и Strigosa_Glucans соответственно.

Однако, в процессе разработки моделей для повышения коэффициента детерминации из таблицы спектров (150) часть из них была удалена: 4 спектра из данных, относящихся к содержанию в зерне масла, 0 – белка и крахмала, 5 – бета-глюканов. Выбор типа предварительной обработки был осуществлён с помощью программы OPUS в зависимости от характеристик и представлял собой в случае белка – мультипликативную коррекцию рассеяния, крахмала – вторую производную, бета-глюканов и масла – векторную нормализацию. Оптимальная предварительная обработка для каждого спектра зависит от типа сигнала (коэффициента пропускания, отражения

света определенной длины волны), характеристик образца, конфигурации прибора.

Как видно из графика на рисунке 2, предсказанные значения для трех повторностей в случае модели содержания белка (Strigosa_Protein) имеют небольшую дисперсию, располагаясь практически вдоль прямой. Высокий коэффициент детерминации $R^2=92,41\%$ дает уверенность в достоверности получаемых результатов. Качество модели определяется также количеством факторов (рангов) – чем их меньше, тем лучше модель (Efimenko et al., 2016; Efimenko, Efimenko, 2019). В случае модели для содержания белка применяли 11 рангов для поиска множественной корреляции между спектральными данными и концентрацией компонента в многофакторном анализе. Среднеквадратичная ошибка предсказания RMSEP (Root Mean Squared Error of Prediction) составляет 0,639%, что говорит об ее «удовлетворительном качестве». Показатель RPD (Residual Prediction Deviation) остаточного отклонения предсказания для ранга оценивает устойчивость полученной зависимости. В случае модели для содержания белка он составил 3,63, что соответствует высокой оценке устойчивости (Efimenko, Efimenko, 2022). Разница между истинным значением параметра, полученного с помощью биохимического анализа, и ожидаемым, то есть показателем смещения или статистической предвзятости (Bias), составляет -0,0331, что подтверждает практически полное совпадение.

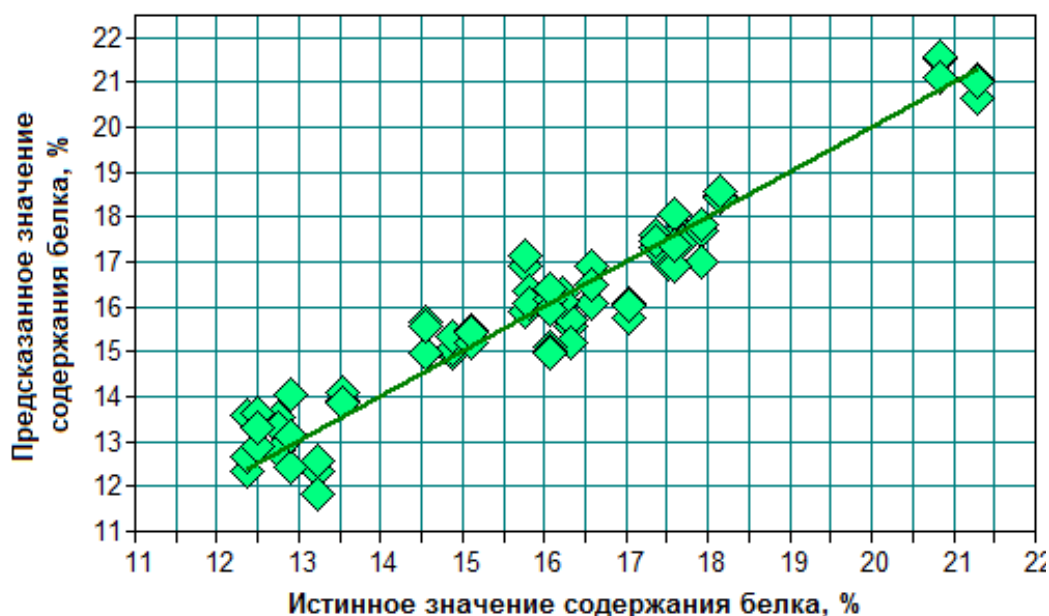


Рис. 2. Предсказанные значения содержания белка в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания белка (ось X) калибровочной модели Strigosa_Protein

Fig. 2. Predicted values of protein content in grain (Y-axis) vs. true protein content (X-axis) in the Strigosa_Protein calibration model

Для калибровочной модели содержания крахмала (Strigosa_Starch), масла (Strigosa_Oil) и бета-глюканов (Strigosa_Glucans), соответственно: R^2 – 96,22, 84,15, 11,24; количество рангов в многофакторном анализе – 5, 15, 13; RMSECV – 0,984%, 0,281%, 0,678%; RPD – 5,63, 2,56, 1,4; Bias – -0,398, 0,0533, 0,443 (рис. 3, 4, 5).

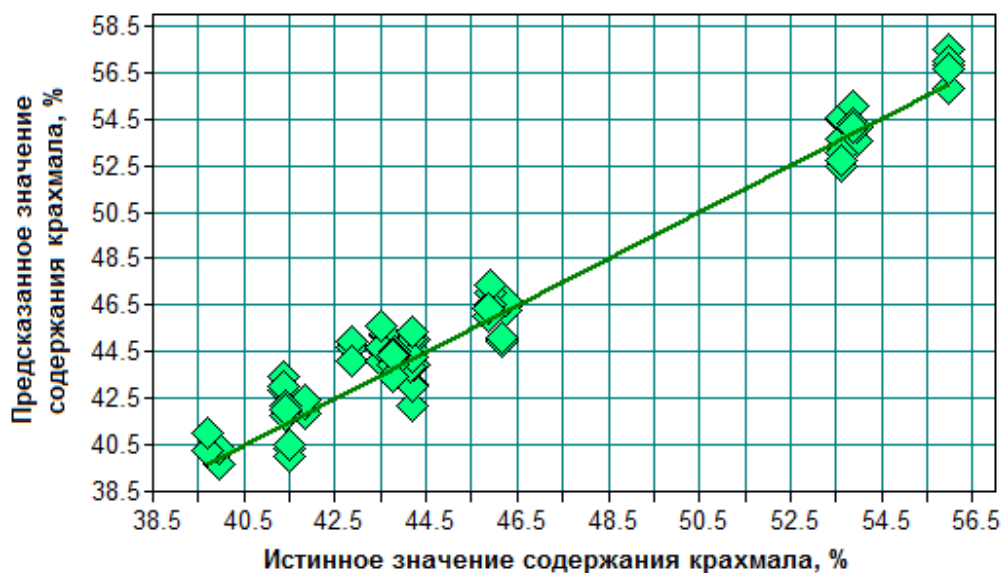


Рис. 3. Предсказанные значения содержания крахмала в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания крахмала (ось X) калибровочной модели Strigosa_Starch

Fig. 3. Predicted values of starch content in grain (Y-axis) vs. true starch content (X-axis) in the Strigosa_Starch calibration model

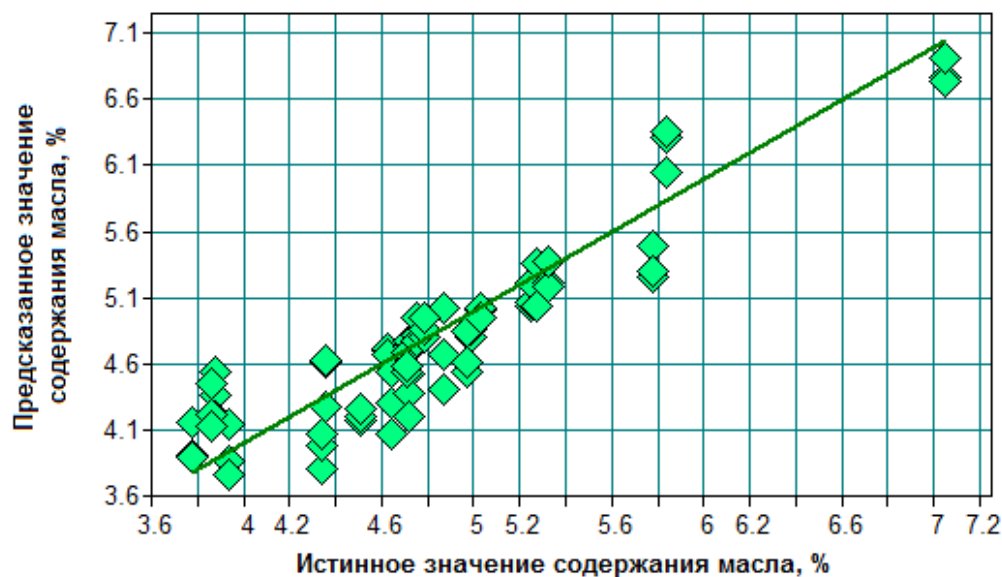


Рис. 4. Предсказанные значения содержания масла в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания масла (ось X) калибровочной модели Strigosa_Oil

Fig. 4. Predicted values of oil content in grain (Y-axis) vs. true oil content (X-axis) in the Strigosa_Oil calibration model

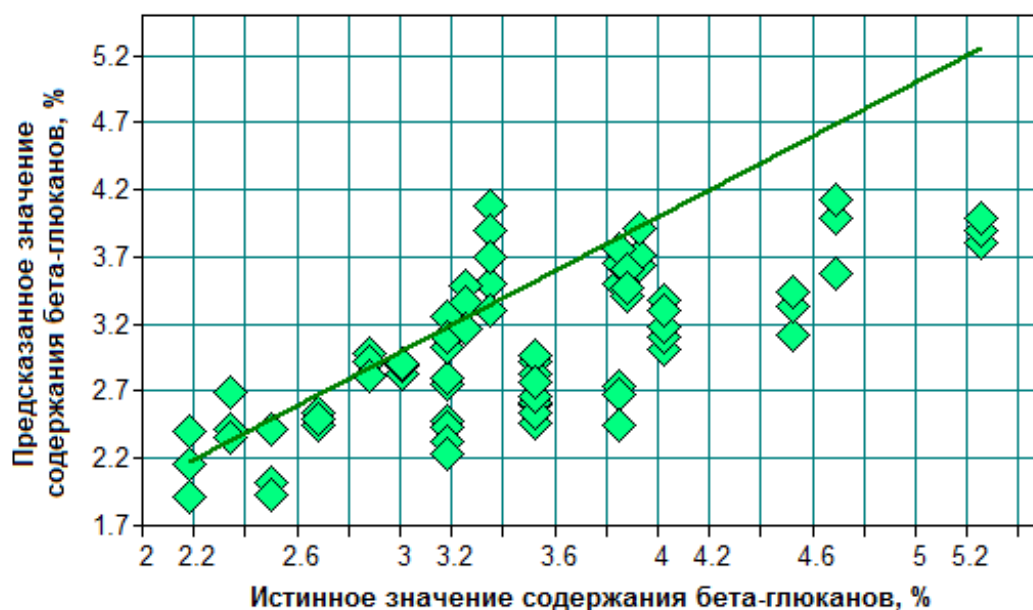


Рис. 5. Предсказанные значения содержания бета-глюканов в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания бета-глюканов (ось X) калибровочной модели Strigosa_Glucans

Fig. 5. Predicted values of beta-glucan content in grain (Y-axis) vs. true beta-glucan content (X-axis) in the Strigosa_Glucans calibration model

Согласно вышеуказанным показателям градуировочная модель для бета-глюканов не является «устойчивой» и в настоящий момент не может быть использована для экспресс-оценки зерна овса песчаного. Характер же расположения значений в градуировочных моделях, полученных для масла, крахмала и белка, являются перспективными для последующей доработки с помощью результатов, полученных для образцов зерна овса других мест и лет репродукции.

Сравнительный анализ проверочной партии новых образцов овса песчаного (10 голозерных и 10 пленчатых форм) по содержанию белка, крахмала и масла в зерне не выявил существенных различий (табл. 2). Установлено, что разница между спектральными показаниями и стандартными химическими методами определения единичных значений составила в среднем для белка от -0,63 до

0,53 %, для крахмала от -1,13 до 0,79 %, для масла от -0,39 до 0,47 % и в среднем составила 0,38 %, 0,57 % и 0,30 %, соответственно.

Предельно допустимое значение погрешности в параллельных измерениях стандартными методами не должно превышать для белка – 0,5%, для крахмала – 1,0% и для масла – 0,7% (GOST 10846-91, 2009a; GOST 10845-98, 2009b; GOST 13496.15-97, 2011). Таким образом, небольшие отклонения наблюдаются по показателям содержания крахмала и белка в зерне, что может быть в дальнейшем устранено путем расширения калибровок с использованием новых образцов овса.

Относительная разница между химическими методами анализа зерна и физическим методом, основанным на ИК-спектроскопии, в среднем не превышает 3-6%.

Таблица 2. Сравнительный анализ зерна овса песчаного по содержанию белка, крахмала и масла, определяемому химическим и спектральным методами

Table 2. Comparative analysis of protein, starch and oil content in black oat kernels determined by traditional and spectral methods

№/ No.	Химический метод/ Chemical method			Спектральный метод/ Spectral method			Разница абсолютная/ Absolute difference			Разница относительная/ Relative difference		
	Б*	К*	М*	Б	К	М	Б	К	М	Б	К	М
Пленчатые образцы/ Covered accessions												
1	16,31	44,18	4,36	16,78	44,42	4,04	-0,47	-0,24	0,32	2,88	0,55	7,23
2	16,32	39,31	4,06	16,52	39,11	4,33	-0,20	0,20	-0,28	1,22	0,50	6,78

№/ No.	Химический метод/ Chemical method			Спектральный метод/ Spectral method			Разница абсолютная/ Absolute difference			Разница относительная/ Relative difference		
	Б*	К*	М*	Б	К	М	Б	К	М	Б	К	М
3	12,76	39,97	4,63	13,23	41,10	5,01	-0,47	-1,13	-0,39	3,70	2,82	8,32
4	14,89	46,25	4,72	14,79	46,01	4,44	0,10	0,24	0,27	0,67	0,52	5,83
5	15,55	46,67	4,05	15,28	46,32	3,85	0,27	0,35	0,20	1,72	0,75	4,94
6	13,53	46,16	4,99	14,02	46,68	4,55	-0,49	-0,52	0,44	3,64	1,13	8,82
7	11,92	48,34	5,19	12,14	48,14	4,84	-0,22	0,20	0,35	1,84	0,41	6,74
8	12,37	44,25	4,64	12,11	45,14	4,93	0,26	-0,89	-0,30	2,14	2,01	6,36
9	14,44	39,93	4,56	14,24	40,68	4,27	0,20	-0,75	0,28	1,42	1,88	6,26
10	12,50	39,71	4,97	13,09	39,19	4,65	-0,59	0,52	0,32	4,68	1,32	6,44
Ср. (пл.)	14,06	43,48	4,61	14,22	43,68	4,49	0,33	0,50	0,32	2,39	1,19	6,77
Голозерные образцы/ Naked accessions												
1	17,68	55,66	6,54	18,07	55,26	6,79	-0,39	0,40	-0,26	2,22	0,71	3,90
2	18,72	53,60	7,05	18,19	54,57	6,58	0,53	-0,97	0,47	2,81	1,81	6,67
3	20,29	53,97	5,25	20,39	54,61	4,79	-0,10	-0,64	0,46	0,48	1,18	8,76
4	18,82	54,70	6,52	18,31	55,59	6,15	0,51	-0,89	0,37	2,68	1,63	5,67
5	18,97	53,87	5,27	18,53	54,58	5,31	0,44	-0,71	-0,04	2,30	1,33	0,85
6	20,96	52,83	4,63	20,47	53,61	4,88	0,49	-0,78	-0,26	2,35	1,49	5,51
7	20,73	53,60	5,32	21,23	52,81	4,98	-0,50	0,79	0,34	2,43	1,47	6,39
8	19,09	53,76	6,83	19,72	53,40	6,56	-0,63	0,36	0,27	3,27	0,67	3,95
9	17,22	55,96	5,84	16,69	56,54	5,85	0,53	-0,58	-0,02	3,11	1,04	0,26
10	16,04	56,90	7,50	16,26	57,20	7,11	-0,22	-0,30	0,39	1,37	0,53	5,20
Ср. (г.)	18,85	54,48	6,07	18,79	54,82	5,90	0,43	0,64	0,29	2,30	1,19	4,72
Среднее	16,46	48,98	5,34	16,50	49,25	5,20	0,38	0,57	0,30	2,35	1,19	5,74

*Б – белок, %; К – крахмал, %, М – масло, %; Ср. (пл.) – средние значения у пленчатых образцов, %;
Ср. (г.) – средние значения у голозерных образцов, %.

Закключение

Получены градуировочные модели для определения содержания белка, крахмала, масла в зерне голозерных и пленчатых образцов овса песчаного, которые являются достоверными и надежными. Показатели апробированы на новых образцах овса с известными значениями анализируемых показателей. Модель для определения содержания бета-глюканов нуждается в доработке.

Постоянное обновление градуировочных моделей, добавление при необходимости новых образцов разных лет и мест репродукции, а также использование стандартов для периодических проверок является обязательным условием для сохранения с течением времени хороших прогнозирующих способностей БИК-градуировок.

Экспресс анализаторы на основе БИК-технологии используются на производственных площадках, а также на площадках контроля качества для экспресс-анализа входящего сырья или же оценки параметров готовой продукции. Данный метод не требует специальной пробоподготовки, дорогих реагентов, посуды и очень прост в обслуживании.

References/Литература

- Efimenko S.G., Efimenko S.K. Determination of oil and moisture contents in mustard seeds using IR spectrometry. *Oil Crops*. 2019;4(180):36-44. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Определение содержания масла и влаги в семенах горчицы с помощью ИК-спектроскопии. *Масличные культуры*. 2019;4(180):36-44). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-36-44
- Efimenko S.G., Efimenko S.K. Express-estimation of oil content and the main fatty acid contents in oil of turnip rape seeds using IR-spectrometry. *Oil Crops*. 2022;1(189):34-44. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Экспресс-оценка массовой доли масла и содержания основных жирных кислот масла в семенах сурепицы с помощью ИК-спектроскопии. *Масличные культуры*. 2022;1(189):34-44).
- Efimenko S.G., Kucherenko L.A., Efimenko S.K., Nagalevskaya Ya.A. Evaluation of the general qualitative traits of soybean seeds using IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2016;3(167):33-38. [in Russian] (Ефименко С.Г., Кучеренко Л.А., Ефименко С.К., Нагалеvская Я.А. Оценка основных показателей качества семян сои с помощью ИК-спектроскопии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016;3(167):33-38).
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Y.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical studies of plants (Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy). A.I. Ermakov (ed.). 3rd ed. Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А.,

- Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд. Ленинград: Агропромиздат; 1987).
- GOST 9404-88. Flour and bran. Method for determining humidity. Moscow: Standardinform; 2007. [in Russian] (ГОСТ 9404-88. Мука и отруби. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2007).
- GOST 10846-91. Grain and products of its processing. Protein determination method. Moscow: Standardinform; 2009a. [in Russian] (ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. Москва: Стандартинформ; 2009а).
- GOST 13496.15-97. Feed, compound feed, compound feed raw materials. Methods for determining crude fat content. Moscow: Standardinform; 2011. [in Russian] (ГОСТ 13496.15-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания сырого жира. Москва: Стандартинформ; 2011).
- GOST 10845-98. Grain and products of its processing. Method for determination of starch. Moscow: Standardinform; 2009b. [in Russian] (ГОСТ 10845-98. Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала. Москва: Стандартинформ; 2009б).
- Hart J.R., Norris K.H. Determination of the moisture content of seeds by Near Infrared spectrophotometry of their methanol extracts. *Cereal chemistry*. 1962;39:94-99.
- Husson O., Charpentier H., Michellon R., Razanamparany C., Moussa N., Enjalric F., Naudin K., Rakotondramanana, Seguy L. Avoine *Avena sativa* et *Avena strigosa*. In: *Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Vol. 3*. Antananarivo: CIRAD; 2012. 8 p. [in French]. Available from: <https://www.supagro.fr/ress-pepites/ingenierieprobleme/res/avoine.pdf> [accessed Jan. 22, 2024].
- Khoreva V.I., Popov V.S., Kon'kova N.G. Application of the IR spectrometry method in the screening study of various oat species. *Ecological genetics*. 2022;20(4):349-357. DOI: 10.17816/ecogen108503
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. (comp.). Guidelines for the study and preservation of the global collection of barley and oats (Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa). I.G. Loskutov (ed.). 4th ed. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / сост.: И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; под ред. И.Г. Лоскутова. Изд. 4-е, доп. и перераб. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Macari S., Rocha M.G., Restle J., Pilau A., Freitas F.K. de, Neves F.P. Evaluation of a mixture of black oats (*Avena strigosa* Schreb.) cultivars with Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) under grazing (Avaliacao da mistura de cultivares de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) com azevem (*Lolium multiflorum* Lam.) sob pastejo) [in Portuguese]. *Ciencia Rural*. 2006;36(3):910-915. DOI: 10.1590/S0103-84782006000300028
- Paris W., Marchesan R., Cecato U., Martin T.N., Ziech M.F., Borges G.D.S. Dynamics of yield and nutritional value for winter forage intercropping. *Acta Scientiarum*. 2012;34(2):109-115.
- Popov V.S., Perchuk I.N., Khoreva V.I. A gravimetric method for the quantitative determination of soluble β -glucan content in oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(1):5-12. [in Russian] (Попов В.С., Перчук И.Н., Хорева В.И. Гравиметрический метод количественного определения растворимых β -глюканов в зерне овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(1):5-12). DOI: 10.30901/2658- 6266-2021-1-ol
- Popov V.S., Shelenga T.V., Kovaleva O.N., Khoreva V.I. Methodological aspects of using NIR spectroscopy to assess biochemical indicators in barley grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):1-9. [in Russian] (Попов В.С., Шеленга Т.В., Ковалева О.Н., Хорева В.И. Методические аспекты использования БИК-спектроскопии для определения биохимических показателей зерна ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):1-9). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-1-9
- Sobczak M.F., Olivo C.J., Gabbi A.M., Charão P.S., Heimerdinger A., da Silva J.H.S., Pereira L.E.T., Ziech M.F., Rossarolla G. Evaluation of an elephant grass pasture mixed with black oats managed under agro ecological principles in the winter period. *Livestock Research for Rural Development*. 2005;17(6):71. Available from: <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd17/6/fat17071.htm> [accessed Jan. 22, 2024].
- Weibull J., Bojesen L.L.J., Rasomavieius V. *Avena strigosa* in Denmark and Lithuania: Prospects for *in situ* conservation. *Plant Genetic Resources Newsletter*. 2002;131:1-6.
- Williams P.C., Implementation of Near-Infrared technology. In: *Near-Infrared technology in the agricultural and food industries*. P.C. Williams, K. Norris (eds). 2th ed. Ch. 8. St. Paul: AACCC; 2001. p.145-169.

Информация об авторах

Виталий Сергеевич Попов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, popovitaly@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

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

Елена Владимировна Блинова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Валентина Ивановна Хорева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

Information about the authors

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

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

Elena V. Blinova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Valentina I. Khoreva, Cand. Sci (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia; horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

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 25.04.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024; принята к публикации 20.06.2024.

The article was submitted on 25.04.2024; approved after reviewing on 06.06.2024; accepted for publication on 20.06.2024.