

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.16:543.42

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117



Методические аспекты использования БИК-спектromетрии для определения биохимических показателей зерна ячменя

В. С. Попов, Т. В. Шеленга, О. Н. Ковалева, 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, v.popov@vir.nw.ru

Актуальность. В статье обсуждается возможность использования спектроскопии ближнего инфракрасного отражения (БИК) для экспресс-оценки биохимических показателей у различных форм и разновидностей ячменя. На основании данных, полученных в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР, построены калибровочные модели содержания белка, крахмала, масла, бета-глюканов и суммы фенольных веществ (ФВ) в зерне, позволяющие в дальнейшем проводить скрининговые исследования различных образцов ячменя.

Материалы и методы. Химический состав зерна изучали в образцах голозерного и пленчатого ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), выращенного в 2022 г. на северо-западе РФ. Калибровочные модели для определения белка, масла, крахмала, бета-глюканов и ФВ (80 образцов) разработаны для ИК-анализатора Matrix-I фирмы Bruker Optics (Германия). При их построении использовали показания, полученные общепринятыми химическими методами анализа. Содержание белка/азота определяли по Кьельдалю, масла – по массе сухого обезжиренного остатка в модификации С. В. Рушковского, крахмала – поляриметрическим методом по Эверсу, бета-глюканов – весовым методом, сумму ФВ – по методу Фолина и Чокальтеу в модификации Синглетона и Росси.

Результаты. Достоверность построенных калибровочных сопоставляли с результатами определения белка, крахмала, масла, бета-глюканов и ФВ, полученными химическими методами. В результате показано: данные, полученные с помощью калибровочных для определения белка и крахмала, являлись достоверными, остальные модели нуждаются в доработке.

Заключение. Предлагаемый метод позволяет сохранить ценный исходный материал, повысить эффективность труда, при этом не нуждается в применении химических реактивов. После сканирования каждого образца можно получить результаты сразу по нескольким показателям с заданной повторностью и стандартным отклонением.

Ключевые слова: зерновые культуры, пленчатый ячмень, голозерный ячмень, калибровочная модель, метод БИК-спектроскопии, белок, крахмал, масло, бета-глюканы, фенольные соединения

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

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Попов В.С., Шеленга Т.В., Ковалева О.Н., Хорева В.И. Методические аспекты использования БИК-спектromетрии для определения биохимических показателей зерна ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):109-117. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

Methodological aspects of using NIR spectroscopy to assess biochemical indicators in barley grain

Vitaliy S. Popov, Tatiana V. Shelenga, Olga N. Kovaleva, Valentina I. Khoreva

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

Corresponding author: Vitaliy S. Popov, v.popov@vir.nw.ru

Background. The possibility of applying near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy for rapid assessment of various biochemical parameters in barley varieties and forms is discussed. The data obtained by the Biochemistry and Molecular Biology Department of VIR served to construct calibration models for the content of protein, starch, oil, beta-glucans, and total phenolic compounds (PhC) in grain, facilitating further screening of various barley samples.

Materials and methods. The chemical composition of grain was studied in naked and covered spring barley (*Hordeum vulgare* L.) accessions grown in 2022 in the northwest of Russia. Calibration models were developed to measure the content of protein, oil, starch, beta-glucans, and PhC (80 accessions) in barley grain with the Matrix-I IR analyzer (Bruker Optics, Germany). The models were constructed on the basis of the data obtained by conventional techniques of chemical analysis. The protein/nitrogen content was assessed using the Kjeldahl method, oil according to the method of defatted dry residue modified by S. V. Ruszkovsky, starch by the polarimetric method according to Evers, beta-glucans by gravimetric analysis, and the total PhC content by the Folin–Ciocâlteu method modified by Singleton and Rossi.

Results. Statistical significance of the constructed calibration tests was compared with the results of measuring protein, starch, oil, beta-glucan and PhC levels by chemical methods. It was shown that the data of calibration techniques for protein and starch were significant, while the remaining models required improvement.

Conclusion. The proposed method helps to preserve valuable source material, increases labor efficiency, and does not require chemical reagents. Scanning each sample makes it possible to obtain data for several indicators at once, with a specified replication and standard deviation.

Keywords: cereals, covered barley, naked barley, calibration model, NIR spectroscopy, protein, starch, oil, beta-glucans, phenolic compounds

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

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

For citation: 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):109-117. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – одна из важнейших, широко распространенных зерновых культур. Ячмень, по данным ФАО (Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН), является четвертой зерновой культурой по объему производства после кукурузы, пшеницы и риса. Россия занимает второе место по производству ячменя в мире (Wiegmann et al., 2019). Наибольшие площади посева сосредоточены на Северном Кавказе, Урале, в Сибири, Центрально-Черноземной и Нечерноземной зонах. Площадь под посевами ярового и озимого ячменя в земледелии России в 2023 г. составляла 7986,6 тыс. га, что на 0,1% (10,5 тыс. га) превышает показатели 2022 г. (Results for 2023..., 2023).

Ячмень широко используется в различных отраслях народного хозяйства: в кормовой промышленности при производстве концентрата для животных, в пивоварении как сырье для приготовления солода, в пищевой промышленности для получения круп и пищевых продуктов, как добавка в хлебопечении в северных и высокогорных районах. В последние годы этот злак признан богатым источником функциональных пищевых ингредиентов благодаря высокому содержанию клетчатки, минералов и антиоксидантов (Shvachko et al., 2021).

По химическому составу зерновка ячменя относится к группе крахмалистого растительного сырья и является важнейшим энергетическим источником. Белок ячменя наиболее сбалансирован по аминокислотному составу по сравнению с другими злаками. Он отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот, включая наиболее дефицитные – триптофан и лизин (Garkavy, Pylneva, 1980). Важнейшей составляющей пищевой ценности зерна ячменя является содержание масла и его жирнокислотный состав (Ribalka et al., 2013). По содержанию бета-глюканов ячмень превосходит другие зерновые культуры (Wood et al., 1977). Вязкие растворы бета-глюканов замедляют всасывание стеролов и глюкозы в кишечнике, что приводит к снижению уровня холестерина в сыворотке крови, постпрандиального уровня глюкозы в крови и инсулина (Krasilnikov et al., 2014). Фенольные вещества (ФВ) считаются важнейшими соединениями у злаковых культур, способствующими повышению их антиоксидантной активности. Эти молекулы являются важными метаболитами растений, обладающими различными физиологическими эффектами (Peng et al., 2015).

При рассмотрении общего химического состава зерна следует учесть, что он колеблется в широких пределах в зависимости от внешних и внутренних факторов. В целом в зерне ячменя содержится (% на сухое вещество): 7–25% белка; 45–68% крахмала; 1,6–3,2% масла, 3–11% бета-глюканов (неперевариваемых полисахаридов) (Pleshkov, 1987).

Наряду с факторами внешней среды немаловажное значение имеют и генетические особенности сорта (Kozmina, 1976). Широкий ареал ячменя в различных природно-климатических зонах, а также его разностороннее использование обуславливают наличие большого количества сортов с хозяйственно ценными признаками качества зерна. В коллекции ВИР в основном каталоге насчитывается 18 500 образцов (Kovaleva et al., 2017).

Для анализа химического состава и изменений, происходящих при созревании и хранении зерна, используются все имеющиеся на сегодняшний день методы анализа. Но более информативным и перспективным методом является БИК-спектроскопия, позволяющая быстро

проводить биохимические исследования большого количества коллекционного материала, выделять образцы с наиболее выраженным проявлением необходимых признаков качества семян для более эффективного использования в кормовой, пищевой промышленности, практической селекции. Этот метод является основой прогнозирования в работе селекционеров.

Цель работы – разработка экспресс-метода БИК-спектроскопии по определению основных биохимических показателей (белка, крахмала, масла, бета-глюканов и ФВ) в зерне ячменя и построение калибровочных моделей.

Материалы и методы

Материалом для построения калибровочных моделей служили образцы ярового ячменя из коллекции ВИР. Сформированный набор выращивали в условиях северо-запада РФ (Ленинградская область). Агроботанический контроль ячменя (посев, наблюдения и сбор урожая) проводился в соответствии с методическими рекомендациями (Loskutov et al., 2012).

Почвы опытного поля дерново-слабоподзолистые, супесчаные по текстуре, с нейтральной кислотностью (рН = 7,1–7,6). Климат характеризуется как умеренно теплый, со средней многолетней температурой воздуха в июле 16,5–17,7°C. Сумма положительных температур составляет 2100–2300°C. Период с температурой выше 10°C длится 105–115 дней. Количество осадков в течение вегетационного периода составляет 550–600 мм в год.

Для построения градуировочных моделей использовали различные по происхождению разновидности голозерных (46) и пленчатых (34) образцов ячменя вида *H. vulgare* за 2022 г. (всего 80 образцов) (Supplementary Materials, Table 1)¹.

Пробоподготовка и методы проведения анализа. Для проведения биохимических анализов зерно непосредственно перед анализом измельчали до размера частиц 10 мкм, используя лабораторную дисковую мельницу CM 290 Cemotec (FOSS, Швеция). Измельченное зерно (муку) помещали в непрозрачные боксы для защиты от света и окисления. Биохимический анализ проводили в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР согласно методикам ВИР (Ermakov, Arasimovich, 1987).

Содержание белка определяли по методу Кьельдаля на приборе UDK 159 Velp Scientifica (Италия). Общее содержание белка рассчитывали по азоту с коэффициентом 5,7. **Содержание масла** – по массе сухого обезжиренного остатка, используя аппарат Сокслета, применяя в качестве растворителя петролейный эфир (температура кипения – 40–70°C). **Содержание крахмала** – поляриметрическим методом по Эверсу с помощью автоматического поляриметра SAC-i (ATAGO, Япония). Коэффициент перерасчета для ячменя – 181,5. **Содержание бета-глюканов** – весовым методом согласно опубликованному описанию (Popov et al., 2023). **Сумму фенольных веществ** – по методу Фолина и Чокальтеу в модификации Синглтона и Росси. Полученные данные выражали в мг экв. галловой кислоты / 1 г образца (Singleton, Rossi, 1965). Влажность определяли измерением определенной массы муки до и после полного высушивания в сушильном шкафу при 100–102 °C.

¹ Приложение, таблица 1, представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117> / Electronic Supplementary Materials, Table 1. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117>.

С использованием программного обеспечения OPUS к спектрометру Matrix-I фирмы Bruker Optics (Германия) получены спектры отражения в ближней инфракрасной области 780–2770 нм ($12800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ с разрешением 16 см^{-1}) для цельнозерновых образцов ячменя. Спектры каждого образца регистрировали в трех повторностях (навеска $30 \pm 5\text{ г}$).

Калибровочные модели рассчитывали методом многофакторного анализа по спектрам образцов с известными значениями определяемых параметров (зерно ячменя с известным содержанием белка, масла, крахмала, бета-глюканов, ФВ). Калибровочные образцы для моделей исследовали при их фактической влажности. Значение коэффициента корреляции модели составляло не менее 0,8.

Анализ. Анализируемую пробу засыпали в кювету, при этом необходимо помещать образец в измерительную кювету таким же образом и в том же объеме, как это делалось при регистрации спектров образцов с известными значениями определяемых показателей, поскольку на интенсивность ИК-спектров большое влияние оказывает плотность упаковки материала в кювете. За окончательный результат измерения принимали среднее арифметическое трех параллельных определений, выполненных в условиях повторяемости и удовлетворяющих условию приемлемости. Полученный результат округляли до первого десятичного знака (Khoreva et al., 2020).

Обработка биохимических данных, определение спектральных характеристик и построение моделей осуществлялись с помощью программного обеспечения OPUS Software. Статистическая обработка данных производилась с использованием пакета программ Microsoft Office 2016. В абсолютных единицах погрешность определения данного метода составляет не более 0,5% и незначительно превышает погрешность арбитражных методов.

Результаты и обсуждение

На спектральные данные большое влияние оказывают фено- и генотипические особенности образцов. Поэтому построение калибровочной модели и подбор об-

разцов для ее проверки необходимо проводить каждый год, периодически добавляя новые образцы, особенно те, которые выходят за определяемые границы, и заново пересчитывать калибровочную модель.

Для построения калибровочных моделей отобрано 80 образцов с содержанием белка (на сухое вещество) от 13,36% до 23,41%, крахмала – 44,52–62,45%, масла – 1,87–3,09%, бета-глюканов для пленчатых форм – 3,55–5,36%, для голозерных – 3,64–6,12%, ФВ – 128–234 мг%. Содержание сухого вещества в исследуемых образцах является относительно стабильным показателем с небольшим диапазоном изменчивости и составляло в среднем 91,83%.

Результаты исследований показали: за счет максимально широкого диапазона изменчивости признаков содержания белка, масла, крахмала, бета-глюканов и ФВ в зерне объединение всех образцов в одну калибровочную позволяет повысить ее устойчивость.

На этапе разработки моделей с помощью программного обеспечения OPUS партию образцов, выбранных для построения калибровочных, разделяли на две равноценные части – калибровочную и тестовую (по 40 образцов). В ходе построения модели по разным алгоритмам просчитывались до 240 спектров (80 образцов по три повторности) по калибровочным образцам с проверкой их на тестовых образцах. В результате анализа спектральных данных были построены калибровочные модели Barley – Protein, Barley – Starch, Barley – Oil, Barley – Glucans, Barley – Phenolic соответственно.

Однако в процессе разработки моделей для повышения коэффициента детерминации из таблицы спектров (240) часть из них была удалена: 5 спектров удалено из данных белка, 10 – из данных масла, 7 – из данных крахмала, 6 – из данных бета-глюканов и 5 – из данных ФВ.

Для модели белка (Barley – Protein) (рис. 1) уверенность в достоверности получаемых результатов дает высокий коэффициент детерминации $R^2 = 88,25$, количество рангов в многофакторном анализе – 13, среднеквадратичная ошибка прогнозирования (RMSECV) – 0,741%. Показатель остаточного отклонения прогноза для ранга (RPD) разработанной модели оценивает устойчивость

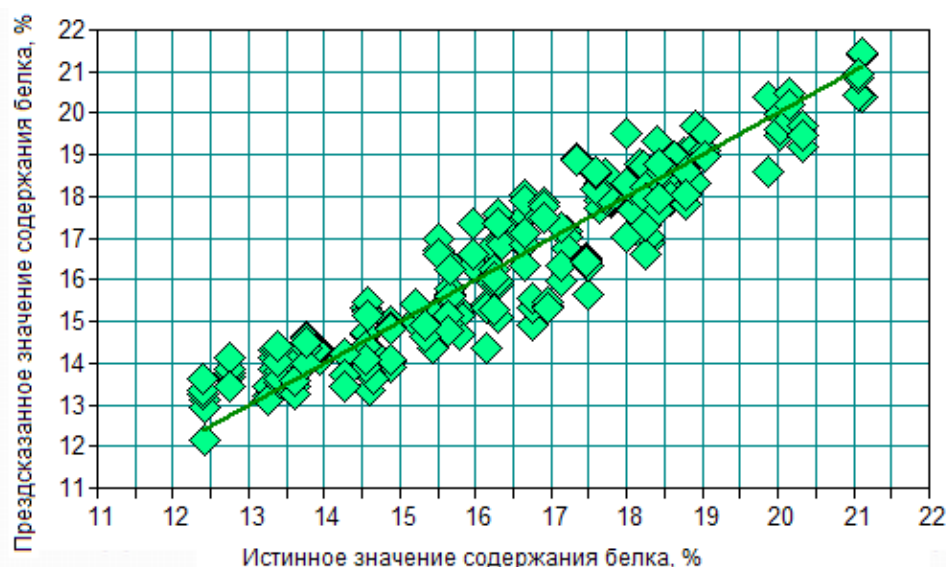


Рис. 1. Предсказанные значения содержания белка в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания белка (ось X) калибровочной модели Barley – Protein

Fig. 1. Predicted values of protein content in grain (Y-axis) versus true protein content (X-axis) of the Barley-Protein Calibration Model

полученной зависимости. Для калибровочной модели белка RPD – 2,92, что соответствует «удовлетворительному качеству» построенных моделей (Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019). Разница между истинным значением параметра, полученного с помощью биохимического анализа, и ожидаемым, то есть показателем смещения или статистической предвзятости (Bias), составляет 0,0213, что подтверждает практически полное совпадение.

Для калибровочной модели крахмала (Barley – Starch), масла (Barley – Oil), бета-глюканов (Barley – Glucans) и суммы ФВ (Barley – Phenolic) R^2 – 79,78; 65,44; 49,47;

26,61; количество рангов в многофакторном анализе – 17, 19, 7, 2; RMSECV – 1,08%, 0,141%, 0,462%, 21,9%; RPD – 2,22, 1,70, 1,41, 1,17; Bias – –0,0171, 0,0049, –0,0012, 0,897 соответственно (рис. 2, 3, 4, 5). Красным цветом выделены неучтенные значения содержания крахмала в образцах ячменя.

Согласно вышеуказанным показателям, калибровочные модели для бета-глюканов и ФВ не являются «устойчивыми» и в настоящий момент не могут быть использованы для экспресс-оценки зерна ячменя. Однако характер расположения значений в калибровочных моделях, полученных для белка, крахмала и масла, является пер-

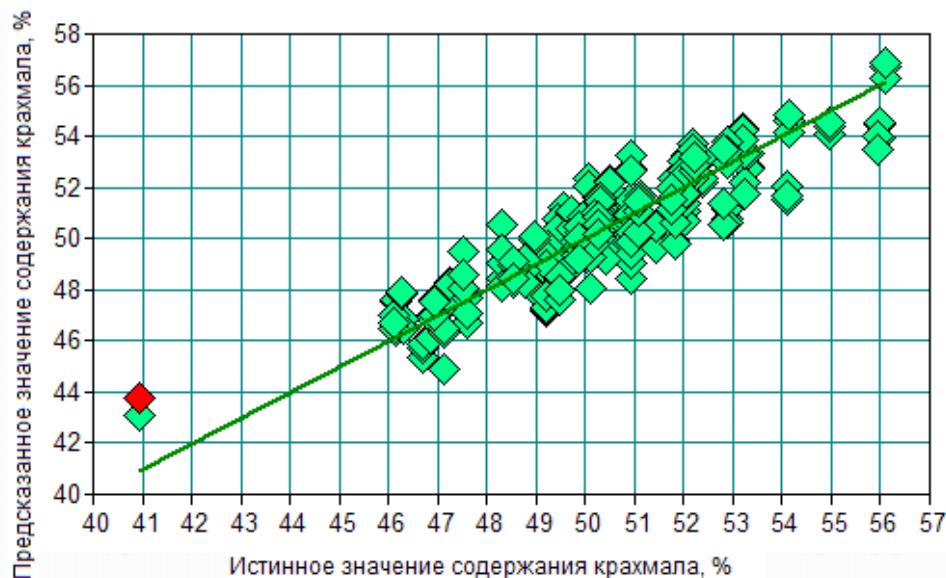


Рис. 2. Предсказанные значения содержания крахмала в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания крахмала (ось X) калибровочной модели Barley – Starch

Fig. 2. Predicted values of starch content in grain (Y-axis) versus true starch content (X-axis) of the Barley–Starch Calibration Model

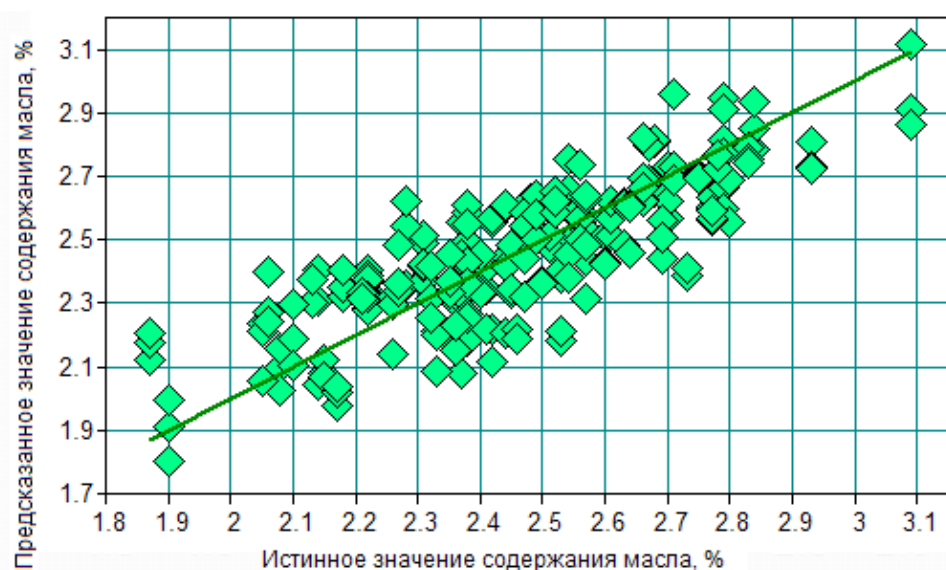


Рис. 3. Предсказанные значения содержания масла в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания масла (ось X) калибровочной модели Barley – Oil

Fig. 3. Predicted values of oil content in grain (Y-axis) versus true oil content (X-axis) of the Barley–Oil Calibration Model

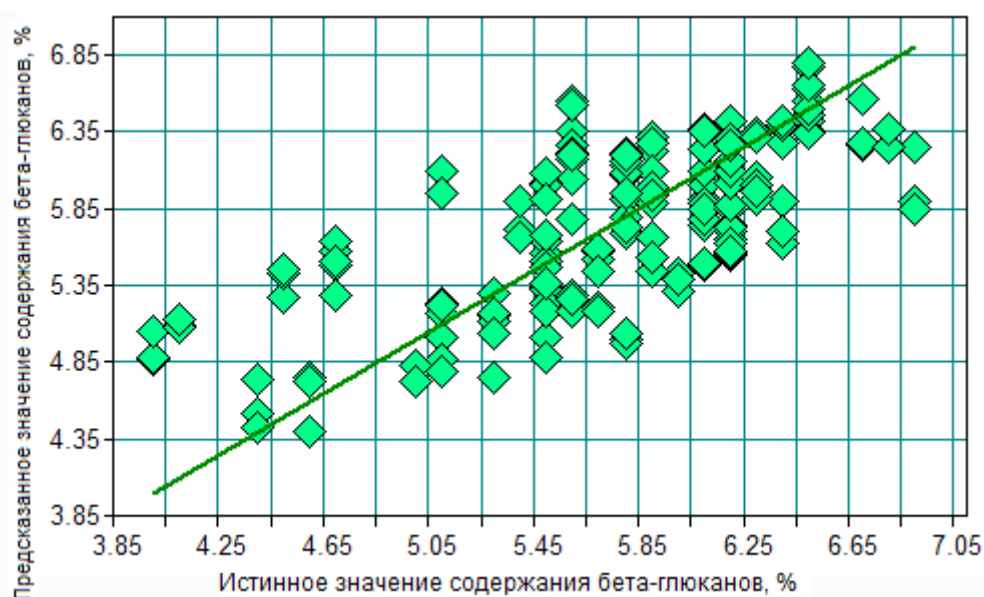


Рис. 4. Предсказанные значения содержания бета-глюканов в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания бета-глюканов (ось X) калибровочной модели Barley – Glucans

Fig. 4. Predicted values of beta-glucan content in grain (Y-axis) versus true beta-glucan content (X-axis) of the Barley–Glucans Calibration Model

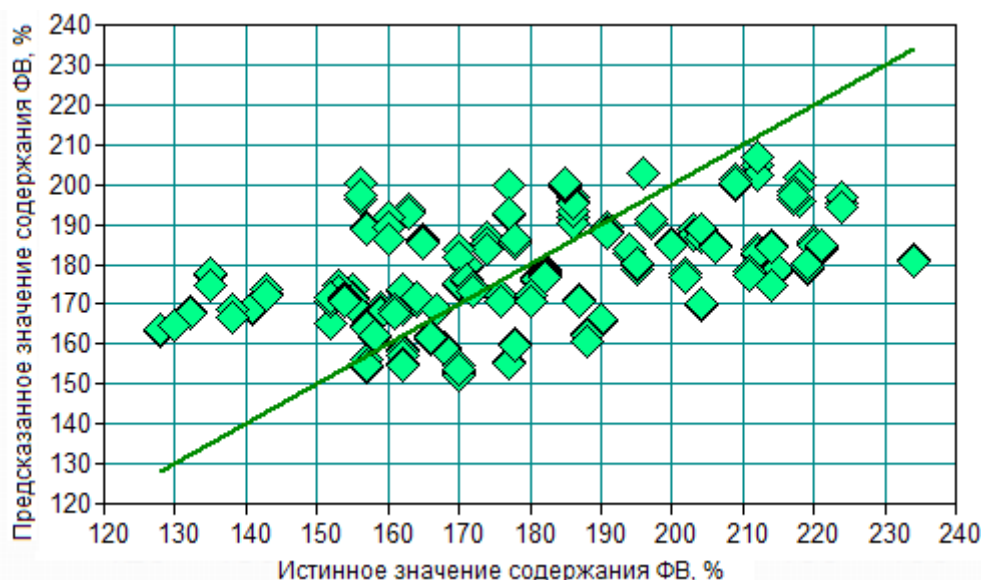


Рис. 5. Предсказанные значения содержания ФВ в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания ФВ (ось X) калибровочной модели Barley – Phenolic

Fig. 5. Predicted values of PhC content in grain (Y-axis) versus true PhC content (X-axis) of the Barley–Phenolic Calibration Model

спективным для последующей доработки с помощью результатов, полученных для образцов зерна ячменя других мест и лет репродукции.

Для проверки правильности построения градуировочных моделей были отобраны другие по происхождению и разновидностям голозерные (15) и пленчатые (15) зерна ячменя урожая 2023 г. (всего 30 образцов) (таблица).

Согласно ГОСТ 32749-2014 «Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области» (GOST 32749-2014..., 2019) рассчитывали рас-

хождение между показаниями ИК-анализатора и значениями, определенными стандартными методами. Среднее значение отклонения $\Delta\bar{X}$ вычисляли по формуле:

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_{ик} - X_{см}|}{n},$$

где $X_{ик}$ – значение показателя, полученное методом ИК-спектроскопии, %;

$X_{см}$ – значение показателя, полученное стандартным методом, %;

n – количество образцов, использованных для проверки градуировки ($n = 30$).

Таблица. Образцы ячменя урожая 2023 г., отобранные для проверки градуировочных моделей
Table. Barley accessions of the 2023 harvest selected for testing the calibration models

№ по каталогу ВИР	Происхождение	Название сорта	Разновидности <i>Hordeum vulgare</i> L.
Группа голозерного ячменя			
31125	Челябинская обл.	Нудум 95	<i>nudum</i>
4526	Ивановская обл.	Местный	<i>nudum</i>
16535	Ставропольский край	–	<i>nudum</i>
29440	Беларусь	N16	<i>neogenes</i>
31178	Германия	Lawina	<i>nudum</i>
23491	Франция	De printemps	<i>nudum</i>
29415	Монголия	Алаг-Эрд-Эне	<i>nudum</i>
31049	США	Bear	<i>nudum</i>
13272	Турция	–	<i>nudum</i>
28645	Мексика	S-274	<i>nudum</i>
16547	Северная Осетия	–	<i>nudum</i>
3115	Таджикистан	Местный	<i>nudum</i>
31367	Латвия	Kornelja	<i>nudum</i>
5411	Болгария	Белый голозерный	<i>nudum</i>
25967	Франция	CF-113	<i>nudum</i>
Группа пленчатого ячменя			
31487	Франция	Авалон	<i>nutans</i>
31491	Германия	Татум	<i>nutans</i>
30984	Новосибирская обл.	Биом	<i>nutans</i>
30023	Швеция	Ingve	<i>nutans</i>
28163	Ленинградская обл.	Мутант 68	<i>nutans</i>
29002	Казахстан	Медикум	<i>medicum</i>
29622	Красноярский край	Маяк	<i>nutans</i>
5151	Тунис	France N104	<i>nutans</i>
12223	Китай	Ychang	<i>nutans</i>
17217	Грузия	032-28	<i>nutans</i>
19188	Украина	Ильинецкий 43	<i>nutans</i>
20236	Япония	Hatakaze	<i>erectum</i>
29435	Свердловская обл.	Импульс	<i>nutans</i>
29268	Респ. Бурятия	Алтан-Булаг	<i>nutans</i>
29001	Челябинская обл.	Таганай	<i>nutans</i>

Значение $\Delta\bar{X}$ не превышает погрешности стандартного метода (для белка – 0,17%, для масла – 0,06%, для крахмала – 0,28%) (Supplementary Materials, Table 2)².

Относительная разница между химическими методами анализа зерна и физическим методом, основанным на ИК-спектроскопии, не превышает 3–5%.

Заключение

Спектроскопию в ближней инфракрасной области применяли для оценки биохимических показателей в цельном зерне ячменя. БИК-спектроскопия является экспресс-методом, позволяет существенно ускорить получение данных по исследуемым показателям, поскольку не требуется предварительная пробоподготовка образцов, приготовление химических реактивов, а сам анализ занимает несколько минут.

На примере образцов зерна ячменя получены калибровочные модели по определению белка, крахмала, масла, бета-глюканов, фенольных веществ. Показатели, полученные с помощью калибровочных кривых для определения содержания белка, масла и крахмала, являлись достоверными и апробированы на новых образцах ячменя с известными значениями анализируемых показателей. Другие модели нуждаются в доработке.

БИК-спектроскопия предназначена для скрининговых анализов, дает возможность после сканирования образца получать результаты сразу по нескольким показателям с заданной повторяемостью и стандартным отклонением. Кроме того, полученные калибровочные модели можно периодически дорабатывать для увеличения точности измерений и при необходимости переносить с одного прибора на другой.

References / Литература

- Efimenko S.G., Efimenko S.K. Determination of oil and moisture contents in mustard seeds using IR spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2019;4(180):36–44. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Определение содержания масла и влаги в семенах горчицы с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2019;4(180):36–44). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-36-44
- Efimenko S.G., Efimenko S.K., Kucherenko L.A., Nagalevskaya Ya.A. Quick-assay of the content of the main fatty acids in oil of rapeseed seeds by means of IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2015;4(164):35–40. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К., Кучеренко Л.А., Нагалеvская Я.А. Экспресс-оценка содержания основных жирных кислот в масле семян рапса с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2015;4(164):35–40).
- 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-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016;3(167):33–38).
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Yu.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical research in 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).
- Garkavy P.F., Pylneva P.N. Amino acid composition of grain in common and high-lysine forms of barley (*Aminokislotny sostav zerna obychnykh i vysokolizinovyykh form yachmenya*). *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki = Bulletin of Agricultural Science*. 1980;7:71–73. [in Russian] (Гаркавый П.Ф., Пыльнева П.Н. Аминокислотный состав зерна обычных и высоколизиновых форм ячменя. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1980;7:71–73).
- 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: 21.07.2023].
- 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
- Kovaleva O.N., Ivanova N.N., Khoreva V.I., Teplyakova S.B., Potokina E.K. Catalogue of the VIR global collection. Issue 851. Barley. Agrobiological characterization of barley accessions and results of molecular testing of alleles of *PPD* photoperiodic reaction genes and *VRN* vernalization genes. I.G. Loskutov (ed.). St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Ковалева О.Н., Иванова Н.Н., Хорева В.И., Теплякова С.Б., Потокина Е.К. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 851. Ячмень. Агробιοлогическая характеристика образцов ячменя и результаты молекулярного тестирования аллелей генов фотопериодической реакции *PPD* и генов яровизации *VRN* / под ред. И.Г. Лоскутова. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).
- Kozmina N.P. Biochemistry of grain and products of its processing (*Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki*). Moscow: Kolos; 1976. [in Russian] (Козьмина Н.П. Биохимия зерна и продуктов его переработки. Москва: Колос; 1976).
- Krasilnikov V.N., Barsukova N.V., Popov V.S. Roles of oat beta-glucan in functional and dietetic food. *Problemy ekonomiki i upravleniya v trgovle i promyshlennosti = Problems of Economics and Management in Trade and Industry*. 2014;2(6):78–83. [in Russian] (Красильников В.Н., Барсукова Н.В., Попов В.С. Бета-глюканы овса в функциональном и лечебном питании. *Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности*. 2014;2(6):78–83).
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. (comp.). Methodological guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (*Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa*). I.G. Loskutov (ed.). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса /

² Приложение, таблица 2, представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117> / Electronic Supplementary Materials, Table 2. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117>.

- сост. И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; под ред. И.Г. Лоскутова. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Peng X.R., Liu J.Q., Wang C.F., Han Z.H., Shu Y., Li X.Y. et al. Unusual prenylated phenols with antioxidant activities from *Ganoderma cochlear*. *Food Chemistry*. 2015;171:251-257. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.08.127
- Pleshkov B.P. Biochemistry of agricultural plants (Biokhimiya selskokhozyaystvennykh rasteniy). Moscow: Agropromizdat; 1987. [in Russian] [Плешков Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений. Москва: Агропромиздат; 1987].
- Popov V.S., Konarev A.V., Kovaleva O.N., Konkova N.G., Khoreva V.I. Weight method for determination of soluble β -glucans in barley grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):45-52. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-45-52
- Results for 2023. Sown areas of cereals and grain legumes in Russia (Itogi za 2023 god. Posevnye ploshchadi zernovykh i zernobobovykh kultur v Rossii). Agrovestnik Internet Portal; Aug. 16, 2023. [in Russian] [Итоги за 2023 год. Посевные площади зерновых и зернобобовых культур в России. Интернет-портал Агровестник; 16.08.2023]. URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/itogi-za-2023-god-posevnye-ploshchadi-zernovykh-i-zernobobovykh-kultur-v-rossii.html> [дата обращения 21.01.2024].
- Ribalka O.I., Polishchuk S.S., Kirdoglo E.K., Morgun B.V. Genetic and breeding criteria for the direct development of naked food barley cultivars (Genetichni ta selekciyni kriterii stvorenniya sortiv golozernogo yachmenyu harchovogo napryamu). *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*. 2013;45(3):187-205. [in Ukrainian] [Рибалка О.І., Поліщук С.С., Кірдогло Є.К., Моргун Б.В. Генетичні та селекційні критерії створення сортів голозерного ячменю харчового напрямку. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2013;45(3):187-205].
- Shvachko N.A., Loskutov I.G., Semilet T.V., Popov V.S., Kovaleva O.N., Konarev A.V. Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production. *Molecules*. 2021;26(8):2260. DOI: 10.3390/molecules26082260
- Singleton V.L., Rossi J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1965;16(3):144-158. DOI: 10.5344/ajev.1965.16.3.144
- Wiegmann M., Maurer A., Pham A., March T.J., Al-Abdallat A., Thomas W.T.B. et al. Barley yield formation under abiotic stress depends on the interplay between flowering time genes and environmental cues. *Scientific Reports*. 2019;9(1):6397. DOI: 10.1038/s41598-019-42673-1
- Wood P.J., Paton D., Siddiqui I.R. Determination of beta-glucan in oats and barley. *Cereal Chemistry*. 1977;54:524-533.

Информация об авторах

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>

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>

Ольга Николаевна Ковалева, 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, o.kovaleva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3990-6526>

Валентина Ивановна Хорева, 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, 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, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.popov@vir.nw.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, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

Olga N. Kovaleva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.kovaleva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3990-6526>

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

Вклад авторов: Попов В. С. – 35%; Шеленга Т. В. – 20%; Ковалева О. Н. – 15%; Хорева В. И. – 30%.

Contribution of the authors: Popov V. S. – 35%; Shelenga T. V. – 20%; Kovaleva O. N. – 15%; Khoreva V. I. – 30%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 13.09.2023; approved after reviewing on 23.11.2023; accepted for publication on 04.03.2024.