

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.6.1422-1430>



УДК 633.34:535.34

Сортовая идентификация сои по статистическим параметрам светопоглощения

© 2025. М. В. Беляков ✉

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва,
Российская Федерация

Исследованы статистические параметры спектров эффективного светопоглощения семян сои различных сортов и групп спелости. Цель исследований – выявить сортовые особенности и разработать алгоритм сортовой идентификации сои по статистическим параметрам спектров поглощения при возбуждении фотолюминесценции. Спектральные характеристики поглощения были получены на дифракционном спектрофлуориметре CM2203 в диапазоне длин волн $\lambda = 230-600$ нм. Рассчитаны статистические параметры спектров – математическое ожидание, дисперсия, асимметрия и эксцесс. Эффективное светопоглощение при возбуждении фотолюминесценции происходит в диапазоне от 300 до 550 нм с основными максимумами на 420 нм, 390 и 362 нм. Поглощение излучения вызвано наличием фенольных кислот, каротиноидов, рибофлавина, а также терпеноидов, спорополленина, липофусцина, лигнина или флавоноидов. Математическое ожидание и дисперсия определяются со сравнительно небольшой относительной погрешностью – не более 1,2 и 7,6 % соответственно, а погрешности определения асимметрии и эксцесса могут достигать 16,1–22 %. По величине асимметрии однозначно может быть идентифицирован сорт Баргузин. Остальные исследованные сорта могут быть с различной вероятностью идентифицированы по всем четырем статистическим параметрам. Сорта Вилана и Вилана бета значительно отличаются по величине дисперсии. Разработан алгоритм сортовой идентификации на основе вероятностной принадлежности сои к известным сортам и получена база данных статистических параметров сортов сои. Для увеличения точности возможна комбинация применения статистических и ранее полученных интегральных параметров поглощения. В дальнейшем предполагается увеличить число идентифицируемых сортов, уточнить диапазоны и разработать оптико-электронную установку сортовой идентификации сои.

Ключевые слова: семена сои, сортовая принадлежность, оптическое излучение, спектры поглощения, алгоритм распознавания

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0007).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беляков М. В. Сортовая идентификация сои по статистическим параметрам светопоглощения. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(6):1422–1430. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.6.1422-1430>

Поступила: 17.07.2025

Принята к публикации: 19.11.2025

Опубликована онлайн: 26.12.2025

Varietal identification of soybeans by statistical parameters of light absorption

© 2025. Mikhail V. Belyakov ✉

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The statistical parameters of the effective light absorption spectra of soybean seeds of various cultivars and ripeness groups were studied. The purpose of the research was to identify the varietal features and to develop an algorithm for varietal identification of soybeans according to the statistical parameters of absorption spectra during photoluminescence excitation. Spectral absorption characteristics were obtained using a CM2203 diffraction spectrofluorimeter in the wavelength range of $\lambda = 230-600$ nm. The statistical parameters of the spectra were calculated – mathematical expectation, variance, skewness and kurtosis. Effective light absorption during photoluminescence excitation occurs in the range from 300 nm to 550 nm with the main maxima at 420nm, 390 and 362 nm. Radiation absorption is caused by the presence of phenolic acids, carotenoids, riboflavin, as well as terpenoids, sporopollenin, lipofuscin, lignin, or flavonoids. The mathematical expectation and variance are determined with a relatively small relative error – no more than 1.2 and 7.6 %, respectively, and the errors in determining skewness and kurtosis can reach 16.1–22 %. By the magnitude of the asymmetry, the ‘Barguzin’ cultivar can be uniquely identified. The remaining studied cultivars can be identified with varying probability by all four statistical parameters.

The 'Vilana' and 'Vilana beta' cultivars differ significantly in terms of variance. An algorithm for varietal identification based on the probabilistic identity of soybeans to known cultivars has been developed and a database of statistical parameters of soybean cultivars has been obtained. To increase accuracy, a combination of statistical and previously obtained integral absorption parameters is possible. In the future it is planned to increase the number of identified cultivars, clarify the ranges and develop an optoelectronic soybean varietal identification system.

Keywords: soybean seeds, cultivar identity, optical radiation, absorption spectra, recognition algorithm

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0007).

The author thanks the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the author declares that there is no conflict of interest.

For citation: Belyakov M. V. Varietal identification of soybeans by statistical parameters of light absorption. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(6):1422–1430. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.26.6.1422-1430>

Received: 17.07.2025

Accepted for publication: 19.11.2025

Published online: 26.12.2025

Соя, как одна из важнейших источников растительного белка, отличается высокой доступностью, приемлемой ценой и питательной ценностью. Из соевых бобов можно приготовить широкий спектр продуктов, таких как быстрорастворимые смеси, белковые концентраты и изоляты, а также текстурированные волокна. Соя часто используется в качестве заменителя мяса благодаря высокому содержанию белка и ценных пищевых компонентов [1]. К настоящему времени мировые объемы экспорта могут возрасти по сравнению с 2016–2020 гг. на 19 %, а в России – почти на 80 %. Значительно превышающие среднемировые ожидаемые темпы роста экспорта из России позволят увеличить долю отечественного экспорта [2]. Реализовать имеющийся потенциал можно, если повысить эффективность растениеводства, разрабатывая средства автоматизации и цифровые технологии [3].

Сортовая идентификация сои необходима для обеспечения чистоты и урожайности сорта. Разные сорта сои отличаются генетической и физической чистотой, способностью к прорастанию и жизнеспособностью [4].

В настоящее время для характеристики новых сортов, заявленных на выдачу патента, все больше применяют современные методы, основанные на анализе микросателлитных локусов ДНК [5]. Метод идентификации сортовой принадлежности с использованием микросателлитных маркеров апробирован для идентификации фальсификата в образцах семян сои [6].

Для количественного определения глицина в соевых бобах и продуктах из них разработан иммуноферментный анализ на основе нанобусин с квантовыми точками CdSe/ZnS (QBs-FLISA). Метод QBs-FLISA успешно применён для выявления семян сои различных сортов и соевых продуктов, полученных с помощью разных технологий обработки [7]. В исследовании [8] использовали электронный

нос HERCALES Fast Gas Chromatography для идентификации и определения характеристик различных летучих соединений в пяти высокоурожайных сортах сои.

Оптическими фотометрическими методами исследовали физиологические характеристики сои для проведения неинвазивной экспресс-диагностики в полевых условиях [9]. Рассмотрена возможность применения методов оптической спектроскопии для идентификации сорта сои. Методами ИК-спектроскопии и UV-VIS-NIR спектроскопии построены модели классификации [10].

К другим оптическим технологиям сортовой идентификации относится метод гиперспектральной визуализации. Для различения сортов семян сои предложена модель, основанная на технологии гиперспектральной визуализации и одномерной сверточной нейронной сети (1D CNN). Получены гиперспектральные изображения в диапазоне 866,4–1701,0 нм [4]. Аналогичные технологии разработаны для идентификации сортов семян кукурузы [11], ячменя в ближнем инфракрасном диапазоне 900–1700 нм [12], сорго [13], риса [14] и пшеницы [15].

Вместе с тем гиперспектральная визуализация проводится исключительно по морфологическим характеристикам зерна и имеет несколько важных ограничений и недостатков – это необходимость предварительной обработки полученных изображений для сглаживания и уменьшения объема данных, что не годится для работы в реальном времени; приборы для инфракрасного диапазона более дорогие, требующие построения высококачественного изображения и необходимости разработки сверточных нейронных сетей. Оптические фотолуминесцентные методы диагностики имеют более низкую стоимость реализации, являются быстродействующими и не требуют построения изображений, поэтому могут стать достойной

альтернативой имеющимся методам сортовой идентификации семян.

Цель исследований – выявить сортовые особенности и разработать алгоритм сортовой идентификации сои по статистическим параметрам спектров поглощения при возбуждении фотолюминесценции.

Научная новизна – впервые получены статистические параметры спектров возбуждения (поглощения) семян сои для идентификации сорта.

Материал и методы. Для проведения исследований использовали семена сои сортов очень ранней спелости – Баргузин, Пума, Саяна, ранней спелости – Грея, Ирбис, Селена, Славия, среднеспелые – Вилана, Вилана бета урожая 2022 года. Параметры, заявленные производителем ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта» (г. Краснодар), представлены в таблице 1 (<https://vniimk.ru/production/>).

Таблица 1 – Параметры исследованных сортов сои различных групп спелости /
Table 1 – Parameters of the studied soybean varieties of different ripening groups

Сорт / Cultivar	Группа спелости / Ripeness group	Потенциальная урожайность, ц/га / Potential yield, c/ha	Масличность семян, % / Oil content of seeds, %	Содержание белка, % / Protein content, %
Баргузин / 'Barguzin'	Очень ранняя / Very early	40	23	41
Вилана / 'Vilana'	Среднеспелая / Mid ripening	57	22	42
Вилана бета / 'Vilana beta'		57	22	42
Грея / 'Greya'	Ранняя / Early	32	18	46
Ирбис / 'Irbis'		45	21	46
Пума / 'Puma'	Очень ранняя / Very early	36	23	43
Саяна / 'Sayana'		37	23	42
Селена / 'Selena'	Ранняя / Early	42	22	43
Славия / 'Slavia'		38	22	43

Среднеранний сорт сои Вилана бета выведен на базе сорта Вилана, по сравнению с которым имеет повышенные интенсивность теневого фотосинтеза и продуктивность нижних затенённых ярусов растений. По результатам сортоиспытания 2018–2019 гг., сорт Вилана бета по урожайности превысил стандартный Вилана [16].

Оптические спектры возбуждения (эффективного поглощения) были измерены на установке, состоящей из автоматизированного дифракционного спектрофлуориметра CM2203 и внешней светозащитной камеры, соединённых кварцевым световодом. Применяли ранее разработанную автором методику [17]. При синхронном сканировании монохроматорами со смещением 80 нм для максимального фотосигнала определяли спектральные коэффициенты эффективного светопоглощения $\eta(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 230\text{--}600$ нм. Было проведено по 50 измерений каждого образца

зерен сои для каждого сорта. Отдельной подготовки проб не требуется, измерения проходили при комнатной температуре и атмосферном давлении. Далее в программном пакете Microsoft Origin произвели расчёт статистических параметров – математического ожидания M_λ , дисперсии σ^2 , асимметрии As и эксцесса Ex .

Математическое ожидание M_λ (в нанометрах) для непрерывного спектрального распределения определяется интегрированием по плотности распределения¹:

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

где λ_1, λ_2 – наименьшее и наибольшее значения длин волн спектра возбуждения (поглощения).

Дисперсия σ^2 , как статистический показатель, который характеризует разброс значений в выборке или совокупности, находится по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^2 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

¹Зиенко С. И., Беяков М. В., Малышкин В. В. Новые методы и средства спектрально-люминесцентного анализа семян растений: монография. Смоленск: Универсум, 2020. 184 с.

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статический момент 3-его порядка μ_3 :

$$\mu_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Более распространенным параметром оценки асимметричности спектрального распределения является асимметрия As , определяемая из соотношения:

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (4)$$

Асимметрия может быть правосторонней ($As > 0$) либо левосторонней ($As < 0$).

Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статического момента 4-ого порядка μ_4 :

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Для анализа крутизны используют эксцесс E_λ :

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (6)$$

Результаты и их обсуждение. Биохимические показатели зерна исследуемых образцов сои определяли на инфракрасном анализаторе FOSS NIRS DS2500 (Дания) в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 году. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Биохимические показатели зерна исследуемых сортов сои, % /
Table 2 – Biochemical indicators of the grain of studied soybean cultivars, %

<i>Copm / Cultivar</i>	<i>Белок / Protein</i>	<i>Влага / Moisture</i>	<i>Жир / Fat</i>	<i>Клетчатка / Fiber</i>	<i>Зола / Ash</i>	<i>Крахмал / Starch</i>
Баргузин / ‘Barguzin’	36,48±0,73	6,37±0,15	17,43±0,85	9,50±0,57	5,91±0,10	3,23±0,16
Вилана / ‘Vilana’	37,95±0,28	6,83±0,28	17,23±0,29	8,15±0,13	6,22±0,14	3,84±0,24
Вилана бета / ‘Vilana beta’	37,53±0,31	6,72±0,19	17,15±0,29	7,76±0,19	6,21±0,08	3,56±0,17
Грея / ‘Gryea’	41,10±0,28	7,09±0,09	17,52±0,20	7,17±0,24	5,56±0,08	2,87±0,16
Ирбис / ‘Irbis’	38,33±0,66	6,47±0,12	17,34±0,42	8,46±0,57	5,77±0,13	3,44±0,20
Пума / ‘Puma’	38,40±0,22	6,88±0,12	16,94±0,57	7,27±0,18	5,75±0,10	2,81±0,20
Саяна / ‘Sayana’	34,73±0,67	6,22±0,13	18,33±0,46	8,24±0,29	5,49±0,11	2,70±0,15
Селена / ‘Selena’	35,40±0,41	6,36±0,11	17,65±0,31	7,93±0,52	4,89±0,08	2,53±0,15
Славия / ‘Slavia’	34,46±0,57	6,32±0,12	17,40±0,24	7,75±0,18	5,22±0,10	2,09±0,17

Содержание белка заметно большее у сорта Грея, наименьшее – Саяна, Селена и Славия. Влагосодержание зерна примерно одинаковое у всех сортов – 6-7 %, содержание жиров не сильно отличается между сортами – 16–18 %. Различия по содержанию крахмала у сортов довольно большие – до 1,84 раза. Параметры зерна сортов Вилана и Вилана бета, как и следовало ожидать, практически не отличаются друг от друга, за исключением содержания клетчатки.

Наибольшая относительная погрешность определения содержания крахмала – 8,2 %, по остальным показателям погрешность меньше: белка не более 2 %; влажности – 4 %; жиров – 5 %; клетчатки – 6,7 %, золы – 2,3 %. Сравнительно большие погрешности определения показателей у сортов Баргузин, Вилана, Славия.

Спектры поглощения зерна сои исследуемых сортов при синхронном сканировании представлены на рисунке 1.

Наибольшее эффективное светопоглощение выявлено в диапазоне длин волн от 300 до 550 нм с основными максимумами примерно на 420 нм, 390 и 362 нм. Область спектра 330–480 нм является суперпозицией этих максимумов.

В области около 360 нм поглощение может быть вызвано наличием фенольных кислот [18]. Поглощение с максимумом около 420 нм объясняется наличием каротиноидов, рибофлавина, а также суперпозицией спектров излучения терпеноидов, спорополленина, липофусцина [19]. Более длинноволновое, но сравнительно малозаметное поглощение около 480 нм может быть вызвано лигнином или флавоноидами [20].

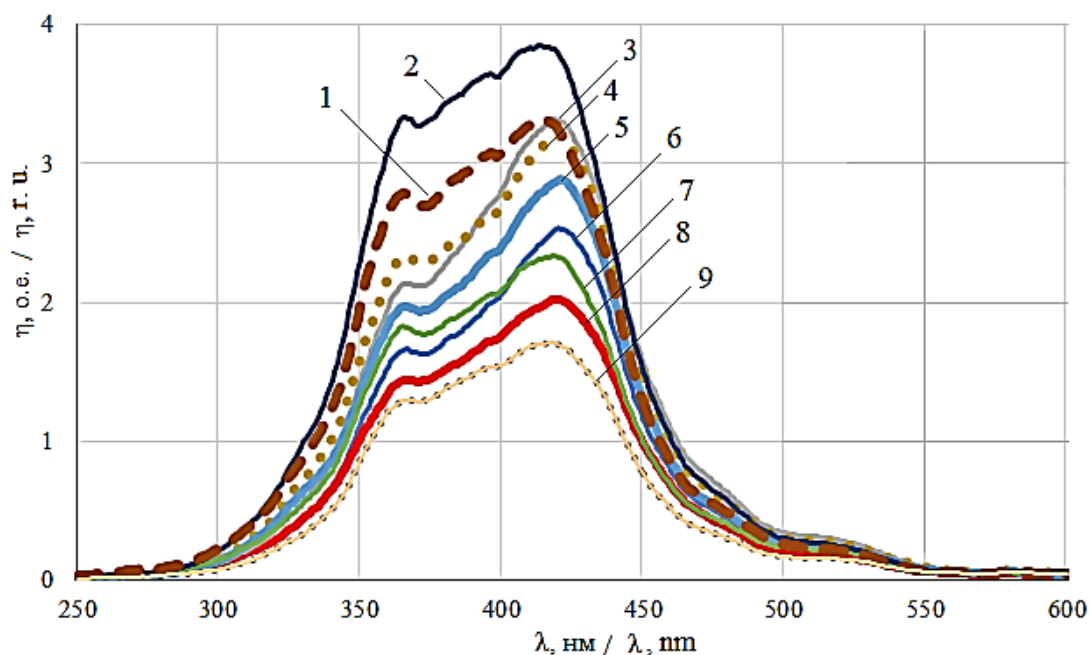


Рис. 1. Спектры поглощения зерна сортов сои различных групп спелости: 1 – Славия, 2 – Селена, 3 – Грея, 4 – Ирбис, 5 – Пума, 6 – Вилана, 7 – Саяна, 8 – Вилана бета, 9 – Баргузин /

Fig. 1. Absorption spectra of soybean varieties of different ripening groups: 1 – ‘Slavia’, 2 – ‘Selena’, 3 – ‘Greya’, 4 – ‘Irbis’, 5 – ‘Puma’, 6 – ‘Vilana’, 7 – ‘Sayana’, 8 – ‘Vilana beta’, 9 – ‘Barguzin’

Ранее было показано, что интегральные параметры возбуждения (поглощательная способность H) и фотолюминесцентного свечения (поток Φ) зависят от конкретного сорта [21].

Результаты расчетов статистических параметров представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 видно, что наименьшая погрешность определения статистических параметров для математического ожидания – 0,5–1,2 %, наибольшая – у сорта Грея. Погрешность определения дисперсии

больше – 2,0–7,6 %, выше всего у сортов Баргузин и Славия. Существенно большая погрешность определения асимметрии 5,6–16,1 % и эксцесса 5,2–22,0 %. Вследствие этого диапазоны доверительных интервалов перекрываются, однако для величины асимметрии у сорта Баргузин имеются заметные отличия от остальных, сорта Пума – отличается большая часть диапазона. Диапазоны распределения асимметрии сои различных сортов представлены на рисунке 2.

Таблица 3 – Статистические параметры спектров поглощения зерна сортов сои различных групп спелости /
Table 3 – Statistical parameters of the absorption spectra of soybean varieties of different ripening groups

<i>Copt / Cultivar</i>	M_{λ} , нм / nm	σ^2	As	Ex
Баргузин / ‘Barguzin’	406±3	2459±186	0,598±0,050	1,262±0,117
Вилана / ‘Vilana’	408±3	2296±94	0,390±0,057	0,908±0,074
Вилана бета / ‘Vilana beta’	406±2	2484±49	0,395±0,035	0,882±0,105
Грея / ‘Greya’	409±5	2325±49	0,469±0,028	0,988±0,217
Ирбис / ‘Irbis’	405±4	2402±98	0,450±0,037	0,927±0,083
Пума / ‘Puma’	406±3	2440±70	0,311±0,050	0,925±0,126
Саяна / ‘Sayana’	404±2	2486±90	0,481±0,036	0,982±0,051
Селена / ‘Selena’	400±3	2186±121	0,498±0,028	1,136±0,083
Славия / ‘Slavia’	399±4	2280±139	0,429±0,068	1,076±0,144

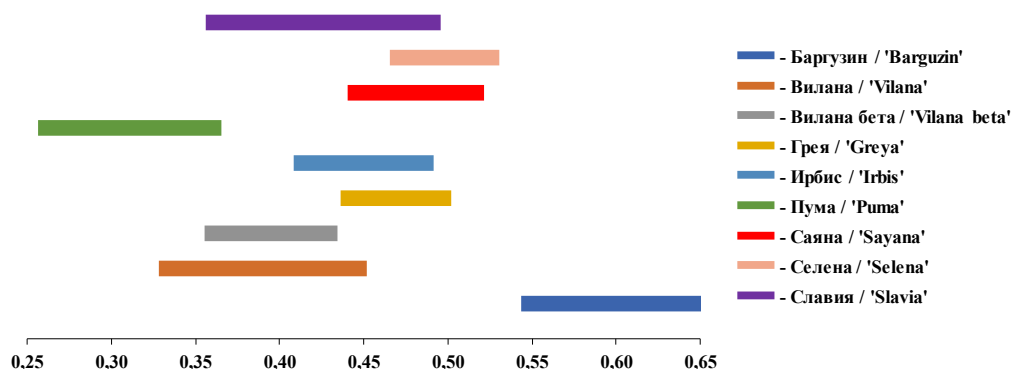


Рис. 2. Диапазоны распределения асимметрии в зерне сои изучаемых сортов /
Fig. 2. Distribution ranges of skewness in soybean grain of various cultivars

Сорта Вилана и Вилана бета почти не отличаются как по средним значениям, так и по диапазонам параметров. Единственным значимым отличием является величина дисперсии, что может быть использовано для идентификации.

По диапазонам математического ожидания различий практически нет, особенно в области 404–408 нм. У сортов Селена и Славия величина M_λ несколько меньше, но это не позволяет однозначно идентифицировать каждый сорт.

Введение дополнительного численного критерия, например, произведения $As \cdot Ex$, хотя и увеличивает разброс средних значений у сортов до 2,6 раза, к сожалению, не позволяет уверенно выявить ни один сорт семян, ввиду перекрытия диапазонов.

Сравнивая результаты по сортовым различиям интегральных параметров [21], следует отметить, что наиболее заметное отличие получено для отношений H_{424}/H_{365} и H_{365}/H_{520} у сорта Селена. Для этого же сорта отличие от других проявляется и для потока Φ . Однако по рассмотренным в данном исследовании статистическим параметрам, сортовые отличия у семян сорта Селена проявляются не столь сильно. Так, достоверную идентификацию семян этого сорта можно получить только по дисперсии при её значении меньше 2141, что составляет меньше трети от всего диапазона принимаемых значений и по асимметрии в диапазоне 0,518–0,526 – всего 14 % от всех принимаемых значений.

В общем случае сортовую идентификацию семян необходимо осуществлять по полученным значениям всех четырех ($j = 4$) статистических параметров: математического ожидания M_λ (Π_1), дисперсии σ^2 (Π_2), асимметрии

As (Π_3) и эксцесса Ex (Π_4), то есть определить вероятности принадлежности сои к сортам C_1 – C_9 .

Для каждого известного сорта C_i параметр Π_j принимает значения от a_{ij} до b_{ij} . Тогда среднее значение составит $c_{ij} = (a_{ij} + b_{ij})/2$ (см. табл. 3 для рассмотренных девяти сортов). Распределение параметра внутри этого интервала имеет плотность $p_{ij}(\Pi)$.

Каждому из сортов для идентифицируемого объекта будет соответствовать на каждом шаге алгоритма вес w_i , характеризующий вероятность его принадлежности к i -тому сорту (0, если такая принадлежность невозможна):

1. В начале алгоритма $i = 9$ равновероятных классов, соответственно берём их веса $w_i = 1$.

2. Алгоритм движется по параметрам – от 1-го до 4-го. На j -м шаге обрабатываем параметр Π_j . Для каждого C_i умножаем w_i на $p_{ij}(\Pi_j)$. Если Π_j не попадает в интервал возможных значений для C_i , то $p_{ij}(\Pi_j) = 0$, и вес немедленно станет нулевым; в противном случае это будет некоторое положительное число.

3. По итогу получается набор весов w_i , часть из которых ненулевые. После нормировки получим вероятности принадлежности к конкретным сортам.

Формальная запись алгоритма сортовой идентификации:

$$p_i = \frac{\prod_{j=1}^4 p_{ij}(\Pi_j)}{\sum_{k=1}^9 \prod_{j=1}^4 p_{kj}(\Pi_j)}. \quad (7)$$

При нормальном распределении и среднеквадратичном отклонении σ_{ij} каждый параметр имеет распределение:

$$p_{ij}(\Pi) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{\Pi - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right), & \Pi \in [a_{ij}, b_{ij}] \\ 0, & \Pi \notin [a_{ij}, b_{ij}] \end{cases}, \quad (8)$$

где Φ – производящая функция при стандартном распределении.

$$\text{Тогда, } p_i = \begin{cases} \frac{\prod_{j=1}^4 \Phi\left(\frac{\pi - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)}{\sum_{\substack{k=1 \\ \pi_k \in [a_{kj}, b_{kj}]}} \prod_{j=1}^4 \Phi\left(\frac{\pi - c_{kj}}{\sigma_{kj}}\right)}, & \text{если } \pi_j \in [a_{ij}, b_{ij}] \text{ для } j = 1 - 4 \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

Полученная база данных параметров исследованных сортов сои позволит на основе предложенного алгоритма проводить сортовую идентификацию семян по статистическим параметрам их поглощения. Направлениями дальнейшего развития становятся:

- увеличение числа идентифицируемых сортов, путем расширения базы данных;
- увеличение количества измерений семян каждого сорта для возможного уточнения диапазонов параметров и снижения погрешности;
- разработка оптико-электронной установки для аппаратной реализации методики объективной сортовой идентификации сои.

Общим достоинством применения статистических параметров поглощения семян является их независимость от абсолютной величины фотосигнала в отличие от интегральных параметров (H и Φ), за исключением отношений H_{41}/H_{42} [21]. Вместе с тем, для более достоверной сортовой идентификации возможна комбинация статистических и интегральных параметров поглощения. Наиболее рациональным будет использование отношений интегральных поглощательных способностей H_{424}/H_{365} и H_{365}/H_{520} как не зависящих от величины сигнала и не требующих измерения спектра фотолуминесценции. Введение этих двух соотношений потребует изменения уравнения (9) при $j = 6$.

Выводы. Исследование статистических параметров спектров эффективного светопог-

лощения семян сои 9 сортов различных групп спелости показало следующее:

1. Область эффективного светопоглощения при возбуждении фотолуминесценции расположена от 300 до 550 нм с основными максимумами на 420, 390 и 362 нм. Поглощение излучения может быть вызвано наличием в семенах фенольных кислот, каротиноидов, рибофлавина, а также терпеноидов, спорополленина, липофусцина, лигнина или флавоноидов.

2. Такие статистические параметры спектров, как математическое ожидание и дисперсия определяются со сравнительно небольшой относительной погрешностью – не более 1,2 и 7,6 % соответственно, в то время как погрешность определения асимметрии и эксцесса для некоторых сортов достигает 16,1–22,0 %.

3. По величине асимметрии однозначно может быть идентифицирован сорт Баргузин ($As \geq 0,548$). Остальные исследованные сорта могут быть с различной вероятностью идентифицированы по всем четырем статистическим параметрам. Сорта Вилана и Вилана бета значительно отличаются по величине дисперсии.

4. Полученная база данных параметров исследованных сортов сои позволит проводить сортовую идентификацию семян. В дальнейшем предполагается увеличить число идентифицируемых сортов, уточнить диапазоны и разработать оптико-электронную установку сортовой идентификации сои.

Список литературы

1. Nowacka M., Trusinska M., Chraniuk P., Drudi F., Lukasiewicz J., Nguyen N. P., Przybyszewska A. et al. Developments in Plant Proteins Production for Meat and Fish Analogues. *Molecules*. 2023;28(7):2966. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28072966>
2. Векленко В. И., Еременко О. В. Прогнозирование мирового и российского экспорта сои. Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2023;(9):222–228. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60016416> EDN: RNYBGL
3. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021;15(4):6–10. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10> EDN: YFRZDV
4. Li H., Zhang L., Sun H., Rao Z., Ji H. Identification of soybean varieties based on hyperspectral imaging technology and one-dimensional convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(8):e13767. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13767>
5. Рамазанова С. А., Савиченко В. Г., Устарханова Э. Г., Логинова Е. Д., Рамазанов Р. Н., Гучетль А. Х. Поиск новых SSR-локусов ДНК для создания эффективной технологии генотипирования сои. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2021;(4(188)):18–24. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-4-188-18-24> EDN: ZCURTO

6. Бондаренко О. Н., Иванов А. А., Пензин А. А. Опыт использования системы паспортизации в установлении сортовой принадлежности сои. Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025;(1(32)):7–14. DOI: <https://doi.org/10.48612/vch/xxxa-gr7g-5kf7> EDN: RVVKVQ
7. Song Q., Liu A., Zhang S., Li R., Qiao S., He P. Quantum Dot Nanobead-Based Fluorescence-Linked Immunosorbent Assay for Detection of Glycinin in Soybeans and Soy Products. *Molecules*. 2022;27:3664. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27123664>
8. Ravi R., Taheri A., Khandekar D., Millas R. Rapid Profiling of Soybean Aromatic Compounds Using Electronic Nose. *Biosensors*. 2019;9(2):66. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios9020066>
9. Зубарева К. Ю., Белозерова А. В., Хрыкина Т. А. Оценка физиологического состояния растений сои методами фотометрической диагностики. Зернобобовые и крупяные культуры. 2024;(1(49)):28–36. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-1-28-36> EDN: JBJZVF
10. Александрова В. А., Лысенкова А. А. Идентификация сорта сои методами оптической спектроскопии. Товаровед продовольственных товаров. 2025;2(247):84–87. DOI: <https://doi.org/10.33920/igt-01-2502-04> EDN: EYKZXZ
11. Ma R., Wang J., Zhao W., Guo H., Dai D., Yun Y. et al. Identification of Maize Seed Varieties Using MobileNetV2 with Improved Attention Mechanism CBAM. *Agriculture*. 2023;13(1):11. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010011>
12. Singh T., Garg N. M., Iyengar S. R. S. Nondestructive identification of barley seeds variety using near-infrared hyperspectral imaging coupled with convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(10):e13821. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13821>
13. Bu Y., Jiang X., Tian J., Hu X., Han L., Huang D., Luo H. Rapid nondestructive detecting of sorghum varieties based on hyperspectral imaging and convolutional neural network. *Journal of Science Food and Agriculture*. 2023;103(8):3970–3983. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12344>
14. Sun J., Zhang L., Zhou X., Yao K., Tian Y., Nirere A. A method of information fusion for identification of rice seed varieties based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(9):e13797. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13797>
15. Zhao X., Que H., Sun X., Zhu Q., Huang M. Hybrid convolutional network based on hyperspectral imaging for wheat seed varieties classification. *Infrared Physics & Technology*. 2022;125:104270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104270>
16. Зеленцов С. В., Мошненко Е. В., Бубнова Л. А., Будников Е. Н., Трунова М. В., Рамазанова С. А. Среднеранний теневыносливый сорт сои Вилана бета. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2020;(1(181)):140–146. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2020-1-181-140-146> EDN: MLWCQZ
17. Беляков М. В. Оптические люминесцентные свойства семян сельскохозяйственных растений. Агрофизика. 2024;(4):72–78. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2024.04.09> EDN: MMYHXZ
18. Pan Y.-L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015;150:12–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>
19. Matveeva T. A., Sarimov R. M., Persidskaya O. K., Andreevskaya V. M., Semenova N. A., Gudkov S. V. Application of Fluorescence Spectroscopy for Early Detection of Fungal Infection of Winter Wheat Grains. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3137–3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030179>
20. Donaldson L. Autofluorescence in Plants. *Molecules*. 2020;25(10):2393. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25102393>
21. Беляков М. В., Лысенкова А. А. Сортные особенности фотолюминесценции сои. Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2025;(2):12–16. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208225020032> EDN: HTYVHD

References

1. Nowacka M., Trusinska M., Chraniuk P., Drudi F., Lukasiewicz J., Nguyen N. P., Przybyszewska A. et al. Developments in Plant Proteins Production for Meat and Fish Analogues. *Molecules*. 2023;28(7):2966. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28072966>
2. Veklenko V. I., Eremenko O. V. Forecasting of global and russian soybean exports. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy. 2023;(9):222–228. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60016416>
3. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4):6–10. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Li H., Zhang L., Sun H., Rao Z., Ji H. Identification of soybean varieties based on hyperspectral imaging technology and one-dimensional convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(8):e13767. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13767>
5. Ramazanov S. A., Savichenko V. G., Ustarkhanova E. G., Loginova E. D., Ramazanov R. N., Guchetl A. Kh. Search of the new SSR-loci of DNA for development of effective technology for soybean genotyping. *Maslichnye kul'turi. Nauchno-tehnicheskyy byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnikh kultur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2021;(4(188)):18–24. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-4-188-18-24>

6. Bondarenko O. N., Ivany A. A., Penzin A. A. The experience of using the certification system in establishing the varietal affiliation of soybeans. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik Chuvash State Agrarian University. 2025;(1(32)):7–14. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.48612/vch/xxxa-gr7g-5kf7>
7. Song Q., Liu A., Zhang S., Li R., Qiao S., He P. Quantum Dot Nanobead-Based Fluorescence-Linked Immunosorbent Assay for Detection of Glycinin in Soybeans and Soy Products. *Molecules*. 2022;27:3664. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27123664>
8. Ravi R., Taheri A., Khandekar D., Millas R. Rapid Profiling of Soybean Aromatic Compounds Using Electronic Nose. *Biosensors*. 2019;9(2):66. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios9020066>
9. Zubareva K. Yu., Belozerova A. V., Khrikina T. A. Assessment of physiological state of soybean plants by photometric diagnostics methods. *Zernobobovye i krupyanie kultury* = Legumes and Groat Crops. 2024;(1(49)):28–36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2024-1-28-36>
10. Aleksandrova V. A., Lisenkova A. A. Identification of soybean variety by optical spectroscopy methods. *Tovarovod prodovolstvennikh tovarov* = Food Products Commodity Expert. 2025;2(247):84–87. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33920/igt-01-2502-04>
11. Ma R., Wang J., Zhao W., Guo H., Dai D., Yun Y. et al. Identification of Maize Seed Varieties Using MobileNetV2 with Improved Attention Mechanism CBAM. *Agriculture*. 2023;13(1):11. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010011>
12. Singh T., Garg N. M., Iyengar S. R. S. Nondestructive identification of barley seeds variety using near-infrared hyperspectral imaging coupled with convolutional neural network. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(10):e13821. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13821>
13. Bu Y., Jiang X., Tian J., Hu X., Han L., Huang D., Luo H. Rapid nondestructive detecting of sorghum varieties based on hyperspectral imaging and convolutional neural network. *Journal of Science Food and Agriculture*. 2023;103(8):3970–3983. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.12344>
14. Sun J., Zhang L., Zhou X., Yao K., Tian Y., Nirere A. A method of information fusion for identification of rice seed varieties based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*. 2021;44(9):e13797. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13797>
15. Zhao X., Que H., Sun X., Zhu Q., Huang M. Hybrid convolutional network based on hyperspectral imaging for wheat seed varieties classification. *Infrared Physics & Technology*. 2022;125:104270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104270>
16. Zelentsov S. V., Moshnenko E. V., Bubnova L. A., Budnikov E. N., Trunova M. V., Ramazanov S. A. A Middle-early shade tolerant soybean cultivar Vilana beta. *Maslichnie kulturi. Nauchno-tekhichesky byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnikh kultur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2020;(1(181)):140–146. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2020-1-181-140-146>
17. Belyakov M. V. Optical luminescent properties of agricultural plants' seeds. *Agrofizika* = Agrophysica. 2024;(4):72–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2024.04.09>
18. Pan Y.-L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2015;150:12–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.007>
19. Matveeva T. A., Sarimov R. M., Persidskaya O. K., Andreevskaya V. M., Semenova N. A., Gudkov S. V. Application of Fluorescence Spectroscopy for Early Detection of Fungal Infection of Winter Wheat Grains. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3137–3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030179>
20. Donaldson L. Autofluorescence in Plants. *Molecules*. 2020;25(10):2393. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25102393>
21. Belyakov M. V., Lisenkova A. A. Sortovye osobennosti foto-lyuminescentsii soi. *Vestnik rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2025;(2):12–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208225020032>

Сведения об авторе

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

Information about the author

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

✉ – Для контактов / Corresponding author